



Universität Bremen

Fachbereich Wirtschaftswissenschaft | FB7

Schriftenreihe des
Lehrstuhls für
Logistikmanagement

Nr. 1
Jahrgang 2012

Kotzab, H. (Hrsg.)

„Nachhaltige Logistik und elektromobile Antriebskonzepte“

Dönmez, Baris

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	IV
Abkürzungsverzeichnis	V
1 Einleitung	1
1.1 Hintergründe	1
1.2 Zielsetzung	2
1.3 Aufbau der Arbeit und Methodik	2
2 Nachhaltige Logistik	4
2.1 Begriffsdefinitionen	4
2.1.1 Der Begriff der Nachhaltigkeit	4
2.1.2 Der Begriff der nachhaltigen Logistik	5
2.2 Gründe für die Notwendigkeit einer nachhaltigeren Logistik	6
2.2.1 Ressourcenverknappung und steigende Energiekosten	6
2.2.2 Treibhauseffekt und Klimawandel	6
2.2.3 Politische Interventionen	7
2.3 Die Messbarkeit von Nachhaltigkeit	8
2.4 Zwischenfazit	8
3 Elektromobile Antriebskonzepte für einen effizienteren Energieeinsatz	9
3.1 Abgrenzung und Definition des E-Mobility Begriffs	9
3.2 Elektromobile Antriebskonzepte	11
3.2.1 Micro-Hybrid	11
3.2.2 Mild-Hybrid	12
3.2.3 Full-Hybrid	13
3.2.4 Reines Elektrofahrzeug (BEV)	14
3.3 Energiespeicher als Kernkomponente	15
3.3.1 Anforderungen an Energiespeicher	15
3.3.2 Relevante Energiespeicher und realisierbare Reichweiten	16
3.4 Einsatzbereiche im Straßengüterverkehr	18
4 Potenziale elektromobiler Antriebskonzepte zur Senkung der CO₂-Emissionen	20
4.1 Einsparpotenziale durch hybridisierte Antriebsstrukturen	20
4.1.1 Bedeutung und Darlegung der Fahrprofile	21
4.1.2 Realisierbare Einsparungen	21
4.1.3 Praxisbeispiele	22
4.2 Einsparpotenziale rein elektrischer Antriebe	23
4.2.1 Bedeutung und Darlegung des Strommixes	23

4.2.2 Realisierbare Einsparungen	24
4.2.3 Praxisbeispiele	25
4.3 Bewertung der Antriebskonzepte	25
5 Das Kostenmodell der Antriebssysteme	27
5.1 Kostenentscheidende Parameter des konventionellen Fahrzeugs	27
5.1.1 Die künftige Entwicklung der Dieselpreise	28
5.1.2 Die künftige Entwicklung des Kraftstoffverbrauchs	28
5.2 Kostenentscheidende Parameter des rein elektrischen Fahrzeugs	29
5.2.1 Die künftige Entwicklung der Batteriepreise.....	30
5.2.2 Die künftige Entwicklung der Strompreise	31
5.3 Gegenüberstellung der Antriebssysteme	31
6 Schlussfolgerungen	33
Literatur- und Quellenverzeichnis.....	XXXVII
Anhang	XLI
a) Daten der Referenzfahrzeuge	XLI
b) Gesamtkostenentwicklung des konventionellen Referenzfahrzeuges	XLII
c) Gesamtkostenentwicklung des rein elektrischen Referenzfahrzeuges	XLIII

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Drei-Säulen-Modell der Nachhaltigkeit	5
Abbildung 2: Die energetische Prozesskette	10
Abbildung 3: Zunehmende Elektrifizierung des Antriebsstranges.....	11
Abbildung 4: Anforderungen an Energiespeicher	16
Abbildung 5: Energiespeicher in E-Konzepten und ihre Reichweiten.....	17
Abbildung 6: Einsatzbereiche der E-Konzepte im Straßengüterverkehr.....	18
Abbildung 7: Realisierbare Kraftstoff- bzw. CO ₂ -Einsparpotenziale von Hybriden	22
Abbildung 8: Realisierbare CO ₂ -Einsparpotenziale rein elektrischer Antriebe im LNFz.....	25
Abbildung 9: Entwicklung der Dieselmkraftstoffpreise.....	28
Abbildung 10: Entwicklung des Kraftstoffverbrauchs.....	29
Abbildung 11: Entwicklung der Batteriepreise	30
Abbildung 12: Entwicklung der Industriestrompreise	31
Abbildung 13: Entwicklung der Gesamtkosten der Antriebssysteme	32
Abbildung 14: CO ₂ -Einsparpotenziale elektromobiler Antriebskonzepte im Straßengüterverkehr	34
Abbildung 15: Abmessungen der Referenzfahrzeuge	XLI

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Datenblatt Micro-Hybrid.....	12
Tabelle 2: Datenblatt Mild-Hybrid.....	13
Tabelle 3: Datenblatt Full-Hybrid	14
Tabelle 4: Datenblatt reines Elektrofahrzeug (BEV)	15
Tabelle 5: Hybridantriebe in unterschiedlichen Fahrzeugklassen	20
Tabelle 6: Derzeitiger durchschnittlicher Strommix Deutschlands.....	24
Tabelle 7: Bewertungsmatrix der CO ₂ -Einsparungen durch elektromobile Antriebskonzepte	26
Tabelle 8: Technische Daten der Referenzfahrzeuge	XLI
Tabelle 9: Gesamtkostenentwicklung des konventionellen Referenzfahrzeuges	XLII
Tabelle 10: Gesamtkostenentwicklung des rein elektrischen Referenzfahrzeuges	XLIII

Abkürzungsverzeichnis

BEV	Battery Electric Vehicle
BVL	Bundesvereinigung Logistik
bzw.	beziehungsweise
CNG	Compressed Natural Gas
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
Ct	Cent
d.h.	das heißt
engl.	englisch
EU	Europäische Union
g	Gramm
HEV	Hybrid Electric Vehicle
km	Kilometer
kW	Kilowatt
kWh	Kilowattstunde
l	Liter
LKW	Lastkraftwagen
Nfz	Nutzfahrzeug
LNfz	Leichtes Nutzfahrzeug
LNG	Liquefied Natural Gas
N1	Nfz mit einem zulässigen Gesamtgewicht bis zu 3,5 t
N2	Nfz mit einem zulässigen Gesamtgewicht von 3,5 t bis zu 12 t
N3	Nfz mit einem zulässigen Gesamtgewicht über 12 t
p.a.	per anno
PKW	Personenkraftwagen
t	Tonnen
u.a.	unter anderem
V	Volt
v.a.	vor allem
vgl.	vergleiche
z.B.	zum Beispiel

1 Einleitung

Nach einer Einführung in die Thematik, soll in diesem Kapitel das Ziel dieser Bachelorarbeit näher erläutert werden. Abschließend wird für ein besseres Verständnis auch auf den Aufbau dieser Arbeit mit der dahinterliegenden Methodik eingegangen.

1.1 Hintergründe

Die Themen Nachhaltigkeit und Klimaschutz gewinnen in der heutigen Zeit immer mehr an Bedeutung. Stetig wachsende Sendungsmengen im Transportsektor erfordern einen höheren logistischen Aufwand, der vermehrt endliche Ressourcen verbraucht und gleichzeitig die Umwelt mit gefährlichen Schadstoffen belastet.¹ Die Gefahr durch den Klimawandel ist inzwischen allgemein bekannt und entwickelt sich im Rahmen dieser Problematik zu einer zentralen politischen und damit auch indirekt ökonomischen Zielgröße.² Damit einhergehend steigt auch der Druck auf die Unternehmen, sich schon gegenwärtig stärker für eine dekarbonisierte Gesellschaft einzusetzen. So warnen Umweltorganisationen schon lange über die Gefahren erhöhter Emissionswirkungen, die zusätzlich durch die neuesten Klimamodelle unterstützt und erklärt werden. Die Politik trägt durch zahlreiche Gesetze und Auflagen zum vermehrten Umweltschutz bei, wobei der Klimaschutzgedanke mittlerweile auch schon die breite Öffentlichkeit erreicht hat.³ So ist es nicht verwunderlich, dass es derzeit kaum noch Unternehmen gibt, die noch keine entsprechenden Umweltziele im Rahmen einer Nachhaltigkeitsstrategie definiert haben, auch wenn es an deren Umsetzung öfter hapert. Wie dringlich die Situation dabei tatsächlich ist, beweisen folgende Zahlen und Trends aus der Logistik:

Weltweit steigt der Gütertransport mit hohen Wachstumsraten. Der Sektor „Transport und Logistik“ hat dabei einen Anteil von 23 % an den weltweiten gefährlichen Kohlenstoffdioxidemissionen, wovon ungefähr 35 % auf den Waren- und Gütertransport entfallen. Sollte es dabei zu keiner Änderung im Entwicklungspfad kommen, gehen Experten von einer Verdopplung der globalen energiebedingten CO₂-Emissionen bis zum Jahr 2050 aus.⁴ Auch in der EU ist der Verkehrsbereich, gemessen am Energieverbrauch und den daraus resultierenden Emissionen, der am schnellsten wachsende Sektor. Hier stieg der Güterverkehr zwischen 1995 und 2007 sogar schneller an, als das preisbereinigte Bruttoinlandsprodukt, wobei rund ein Fünftel aller Schadstoffemissionen dem Straßenverkehr zuzurechnen sind.⁵ In Deutschland ist die Logistik der zweitgrößte Emittent des umweltschädlichen Gases CO₂. Für die weitere Entwicklung des Transportsektors gehen hier Prognosen von einer 28-prozentigen Erhöhung des Güterverkehrsaufkommens und einer 71-prozentigen Steigung des Güterverkehrs bis zum Jahr 2025 aus, wobei auch hier bis 2050 mit einer Verdopplung der Verkehrsleistung und der daraus resultierenden Emissionen zu rechnen ist.⁶

Insgesamt stellen diese Entwicklungen für den Transportsektor und der Logistik eine besondere Herausforderung dar. Während zum einen die Nachfrage nach Transportleistungen mit hohen Wachstumsraten immer weiter ansteigt, sollen sich auf der anderen Seite die gefährlichen Emissionen

¹ Vgl. Gregori & Wimmer (2011), S. 194

² Vgl. Spitz (2011), S. 12

³ Vgl. Philip (2009), S. 50

⁴ Vgl. Onlinequelle: PricewaterhouseCoopers (2009)

⁵ Vgl. Rogall (2012), S. 619

⁶ Vgl. ebenda, S. 621 ff.

nach Möglichkeit nicht weiter erhöhen, idealerweise sogar abgesenkt werden. Konsens ist aber, dass der Sektor „Transport und Logistik“ in dieser Rolle eine besondere Verantwortung übernimmt, indem ein Gegensteuern dringendst geboten ist.

1.2 Zielsetzung

Vor diesem Hintergrund verschärft sich somit in jüngster Zeit der Appell an die Unternehmen, die immer weiter ansteigenden Transportleistungen im Rahmen einer nachhaltigeren Logistik umweltfreundlicher zu gestalten. Die Herausforderung liegt dabei darin, das Wachstum des logistischen Transportaufkommens und den daraus resultierenden Emissionen voneinander zu entkoppeln und eine unkorrelierte Entwicklung dieser beiden Zielgrößen zu erreichen.⁷ Wegen ihres hohen Anteils an den klimaschädlichen Emissionen stehen dabei naturgemäß die in der Logistik eingesetzten Transporttechnologien –insbesondere deren Antriebstechniken– im Mittelpunkt.⁸

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit sollen deshalb die elektromobilen Antriebskonzepte als eine mögliche operative Lösung für den Straßengüterverkehr vorgestellt und hinsichtlich ihren Beitrags zur Reduzierung des klimaschädlichen Gases Kohlenstoffdioxid (CO₂) untersucht und bewertet werden. Dabei lautet die konkrete Fragestellung:

„Welche Potenziale bieten elektromobile Antriebskonzepte zur Senkung der CO₂-Emissionen innerhalb einer nachhaltigeren Logistik für den Straßengüterverkehr?“

Dabei müssen sich ökologische und wirtschaftliche Ziele nicht zwangsmäßig gegenseitig ausschließen. Durch die Implementierung neuartiger Technologien wie der der elektromobilen Antriebskonzepte, können sich durch ressourcenschonendes Handeln auch Kostenvorteile für das Unternehmen ergeben.⁹ Fakt ist jedoch, dass derzeit die Anschaffungskosten elektromobiler Fahrzeuge, den der konventionell angetriebenen um Weiten übersteigen, weshalb im Rahmen einer zweiten Forschungsfrage auch auf die Wirtschaftlichkeit eingegangen werden soll. Die konkrete Fragestellung dazu lautet:

„Ab wann lohnt es sich ein rein elektrisch betriebenes Nutzfahrzeug unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten und Berücksichtigung der Einsatzrestriktionen, mit in den Fuhrpark eines Logistikdienstleisters aufzunehmen?“

Aus den beiden Fragestellungen wird deutlich, dass das Hauptaugenmerk dieser Bachelorarbeit zunächst auf der Ökologie liegt, um anschließend bedingt durch den Dualitätscharakter der elektromobilen Antriebssysteme, auch auf die Wirtschaftlichkeit einzugehen, wobei im Hintergrund stets der Gedanke der Nachhaltigkeit steht.

1.3 Aufbau der Arbeit und Methodik

Die Prüfungsordnung des Studienganges „Wirtschaftsingenieurwesen B.Sc.“ an der Universität Bremen legt fest, dass Bachelorarbeiten die am Fachbereich 7 geschrieben werden, einen Umfang von 30 Seiten netto nicht überschreiten sollen. Aus diesem Grund wurde in dieser Arbeit ein Anhang

⁷ Vgl. Gregori & Wimmer (2011), S.17

⁸ Vgl. Bretzke & Barkawi (2010), S. 69

⁹ Vgl. Spitz (2011), S. 13

errichtet, um den eigentlichen Rahmen der Arbeit nicht zu sprengen und dennoch relevante Inhalte mit in die Ausarbeitungen aufzunehmen. So kann es vorkommen, dass an entsprechenden Stellen für weitergehendes Wissen auf den Anhang verwiesen wird. Desweiteren gliedert sich diese Bachelorarbeit in insgesamt 6 Kapitel auf, die wie folgt aufgebaut sind:

In Kapitel 1 sollen mit der Einleitung zunächst hintergründige Informationen zum derzeitigen Stand und der zukünftigen Entwicklung des Sektors „Transport und Logistik“ aufgezeigt werden, welches sich unter dem steigenden Druck von Nachhaltigkeitsaspekten befindet. Anschließend werden die Ziele der Arbeit beschrieben, um daraufhin auf den Aufbau dieser Arbeit mit der dahinterliegenden Methodik einzugehen.

Die daran anschließenden Kapitel 2 + 3 beinhalten den theoretischen Teil dieser Arbeit, die für die Beantwortung der beiden Forschungsfragen relevant sind. Während Kapitel 2 das Thema „Nachhaltige Logistik“ behandelt, werden in Kapitel 3 die elektromobilen Antriebskonzepte für einen effizienteren Energieeinsatz und als eine mögliche operative Lösung für den Straßengüterverkehr vorgestellt.

In Kapitel 4 werden anschließend die dadurch realisierbaren Einsparungen im logistischen Anwendungsfeld in Bezug auf das klimaschädliche Gas CO₂ untersucht, indem Potenziale aufgedeckt und abschließend bewertet werden. Das Kapitel zielt dabei in erster Linie auf die Beantwortung der ersten Forschungsfrage ab, die sich auf die ökologische Säule der Nachhaltigkeit bezieht.

Kapitel 5 hingegen widmet sich der wirtschaftlichen Seite und dadurch speziell der Beantwortung der zweiten Forschungsfrage, indem eine Wirtschaftlichkeitsanalyse auf Basis von Referenzfahrzeugen aus Sicht eines Logistikdienstleisters durchgeführt wird. Hierzu wird ein Kostenmodell entwickelt, das die anfallenden Kosten elektromobiler und konventioneller Antriebe in einer vergleichenden Analyse über die nächsten Jahre betrachtet und Aufschluss über die möglichen Kostenentwicklungen in der Zukunft gibt.

In Kapitel 6 werden die Ergebnisse zusammenfassend dargestellt und Schlussfolgerungen aus den zuvor erarbeiteten Erkenntnissen abgeleitet. Damit schließt das Kapitel und gleichzeitig auch die gesamte Bachelorarbeit ab.

Für die Informationsbeschaffung dieser Arbeit wurde dabei auf ein umfangreiches Literaturrepertoire zurückgegriffen, auf das an den entsprechenden Stellen mit dem jeweiligen Werk verwiesen wird. Hinzu kommen wissenschaftliche Beiträge, Artikel aus Zeitschriften, Studien und jene Informationen aus dem Internet, die ebenfalls zur Erkenntnisgewinnung beigetragen haben und ergänzend zu den Literaturquellen stehen.

2 Nachhaltige Logistik

Bevor wir uns der Analyse von Lösungsmöglichkeiten durch elektromobile Antriebskonzepte zuwenden, werden in diesem Kapitel zunächst die theoretischen Grundlagen der nachhaltigen Logistik erarbeitet. Dazu werden einleitend Begriffsdefinitionen erläutert, um über die hauptsächlichen Treiber und Beweggründe für die Notwendigkeit nachhaltiger Ansätze in der Logistik, die Messbarkeit von Nachhaltigkeit aufzuzeigen.

2.1 Begriffsdefinitionen

Allenthalben trifft man auf das Wort Nachhaltigkeit, welches sich in den letzten Jahren zu einem zentralen Begriff durchgesetzt hat. Viele sprechen davon, auch wenn ihnen die genaue Bedeutung nicht geläufig ist, da es sich schlichtweg mit der Zeit zum Schlagwort entwickelt hat.¹⁰ Daher soll zunächst der allgemeine Begriff der Nachhaltigkeit erläutert werden, um diesen anschließend auf die Logistik zu beziehen.

2.1.1 Der Begriff der Nachhaltigkeit

Der Begriff der Nachhaltigkeit beschreibt den Gedanken, ein System lediglich so zu nutzen, dass es in seinen wesentlichen Eigenschaften langfristig erhalten bleibt. Im eigentlichen Wortsinn bedeutet dies, dass *„regenierbare, lebende Ressourcen nur in dem Maße genutzt werden dürfen, wie Bestände natürlich nachwachsen“*¹¹ Der Hintergrund dieser Definition lässt sich dabei bis ins 18. Jahrhundert zurückverfolgen und findet seinen Ursprung in der Forstwirtschaft. Der Gedanke dabei war, die Menge der abgeholzten Bäume den Umfang der Nachwachsenden nicht übersteigen zu lassen, um dadurch die Versorgung wichtiger Wirtschaftszweige zu der Zeit des Bergbaus sicherzustellen, mit dem primären Ziel, bedeutende Produktionsressourcen langfristig zu sichern. Dieses wurde dabei über das Gleichgewicht zwischen der Produktion und dem Nachwachsen der Bäume erreicht.¹²

In der heutigen Zeit beschränkt sich der Begriff der Nachhaltigkeit nicht nur auf die ökologische Tragfähigkeit, sondern wurde um die Aspekte der ökonomischen und sozialen Dimensionen ausgeweitet. Das so genannte „Drei-Säulen-Modell“ der Nachhaltigkeit, in dem ökologische, ökonomische und soziale Nachhaltigkeit gleichrangig nebeneinanderstehen, hat in dieser Konstellation immer mehr an Bedeutung gewonnen, sodass selbst die Enquete-Kommission des Deutschen Bundestages „Schutz des Menschen und der Umwelt“ diese Beschreibung heute als feste Begriffsdefinition verwendet und als prominentester Vertreter dieses Ansatzes gilt.¹³ Das Modell soll dabei den notwendigen integrativen Ansatz sichtbar machen bzw. die Stützung der Nachhaltigkeit durch die drei Säulen verdeutlichen.¹⁴ Die nachfolgende Abbildung 1 zeigt darauf basierend das genannte Modell mit ihren drei Säulen, die im Folgenden näher beschrieben werden, um anschließend den Begriff der Nachhaltigkeit im Kontext der Logistik zu erläutern.

¹⁰ Vgl. Grunwald & Kopfmüller (2012), S. 7

¹¹ Ott (1999), S. 14 ff.

¹² Vgl. Gregori & Wimmer (2011), S. 23

¹³ Vgl. Weinreich, (2003), S. 21 ff.

¹⁴ Vgl. Petschow et al. (1998), S. 24

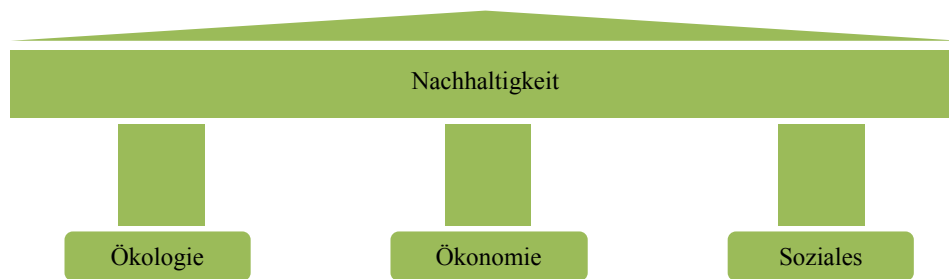


Abbildung 1: Drei-Säulen-Modell der Nachhaltigkeit¹⁵

Die Säule der ökologischen Nachhaltigkeit richtet sich am stärksten an den Ursprungsgedanken. Wie oben beschrieben dürfen nur so viele natürliche Ressourcen genutzt werden, wie auch nachwachsen. Die Natur und die Umwelt sollen dadurch im Gleichgewicht und für die nachfolgenden Generationen erhalten bleiben.¹⁶

Die Säule der ökonomischen Nachhaltigkeit fordert die Fähigkeit einer Ökonomie sich auf verändernde Rahmenbedingungen so anzupassen, dass sie dadurch dauerhaft betrieben werden kann. In Summe verlangt sie dadurch die Erhaltung bzw. Erhöhung des physischen Kapitals.¹⁷

Die Säule der sozialen Nachhaltigkeit stellt die gesellschaftliche Forderung dar, soziale Spannungen in Grenzen zu halten und Konflikte nicht eskalieren zu lassen. Insgesamt soll dadurch das friedliche Leben der Menschen miteinander bestärkt werden.¹⁸

2.1.2 Der Begriff der nachhaltigen Logistik

Soll der Begriff der Nachhaltigkeit dabei auf das Logistikverständnis bezogen werden, existiert derzeit in Wissenschaft und Praxis keine einheitliche Begriffsbestimmung darüber, was sich genau hinter diesem Wortpaar verbirgt.¹⁹ In der Literatur führen sich größtenteils Maßnahmenbündel zur Realisierung nachhaltiger Logistik, ohne den Begriff selbst genauer zu beleuchten. So wird oftmals von der „grünen Logistik“ (engl.: green logistics) gesprochen, der zwar wichtige Ansätze zur Verringerung verkehrsbedingter und stationärer Umweltbelastungen durch die Logistik liefert, aber im Endeffekt nicht auf die drei Säulen der Nachhaltigkeit abzielt und somit in der Gesamtsumme schlichtweg zu kurz kommt.²⁰ Einen geeigneteren Ansatz mit der Integration aller Säulen der Nachhaltigkeit in den Logistik-Begriff liefert dabei die Arbeitsgruppe des Wissenschaftlichen Beirats der BVL Deutschland, der den allgemeinen Begriff „Logistik“ schon per definitionem als „Nachhaltige Logistik“ auffasst, indem es die primären wissenschaftlichen Fragestellungen der Logistik auf die Konfiguration, Organisation, Steuerung oder Regelung der Flüsse von Objekten (v.a. Güter und Personen) in Netzwerken durch Zeit und Raum bezieht mit dem Anspruch, „dadurch

¹⁵ In Anlehnung an Onlinequelle: Spindler, E. (2012), S. 13

¹⁶ Vgl. Schönberger et al. (2010), S. 484

¹⁷ Vgl. ebenda

¹⁸ Vgl. ebenda

¹⁹ Vgl. lastmile logistics netzwerk (2010), S. 8

²⁰ Vgl. Gregori & Wimmer (2011), S. 24 ff.

Fortschritte in der ausgewogenen Erfüllung ökonomischer, ökologischer und sozialer Zielsetzungen zu ermöglichen.“²¹

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit können dabei bedingt durch die beiden Fragestellungen lediglich auf die ökologischen und ökonomischen Aspekte der Nachhaltigkeit eingegangen werden, da eine ganzheitliche Betrachtung den Rahmen der Arbeit sprengen würde.

2.2 Gründe für die Notwendigkeit einer nachhaltigeren Logistik

Im weiteren Verlauf der Ausführung werden die Gründe genannt, die für eine nachhaltigere Logistik sprechen. Dabei wird geklärt, warum auf einen energieeffizienteren Energieeinsatz in der Logistik ausgewichen werden muss, wobei diese in Ressourcenverknappung und steigende Energiekosten, Klimawandel und Treibhauseffekt sowie den politischen Interventionen unterteilt ist.

2.2.1 Ressourcenverknappung und steigende Energiekosten

Mehr als über 60 % der weltweiten Erdölproduktionen werden im Sektor „Transport und Logistik“ verwendet und verbrannt.²² Viele wichtige Transportmittel im logistischen Einsatz, wie Flugzeuge, LKW's und Schiffe werden dabei nicht so schnell vom Öl loskommen können, weshalb die Logistik nicht nur vor einem großen Klima-, sondern auch vor einem ernstzunehmenden Energieproblem gegenübersteht.²³ Die Ressourcenverknappung basiert dabei auf einer immer größer werdenden Kluft zwischen Ölbedarf einerseits und dem Ölangebot andererseits. Während der Bedarf nach dem „schwarzen Gold“ weltweit bedingt durch die Industrialisierung und dem immer höher werdenden Lebensstandard weiter anstieg, zeigen die Erschließungen nach neuen Ölquellen seit den 70er Jahren einen fallenden Verlauf an, sodass seit den 80er Jahren der Bedarf die eigentliche Menge der Neufunde des Öls übersteigt und insgesamt zu einer Verknappung dieser Ressource führt.²⁴ Die Abhängigkeit des Transportsektors vom Öl wirft dabei in erster Linie ökonomische Fragen auf, da sich die Ära endlicher Rohstoffe unweigerlich zu Ende neigt und dadurch den Preis für fossile Brennstoffe in unermessliche Höhen treibt. Die Experten der „Peak-Oil-These“ behaupten, dass die Höchstgrenze des zu fördernden Erdöls bereits erreicht ist, weshalb in naher Zukunft mit sprunghaften Preisanstiegen beim Öl und den daraus resultierenden Endenergien zu rechnen ist.²⁵ Für die Logistik bedeutet dieser Umstand in erster Linie die Erhöhung der Transportkosten, die durch einen effizienteren Energieeinsatz im Rahmen einer nachhaltigeren Logistik kompensiert oder idealerweise reduziert werden müssen.

2.2.2 Treibhauseffekt und Klimawandel

Zu dem derzeitigen Stand der Wissenschaft werden zwei unterschiedliche Positionen zu den Ursachen des Klimawandels vertreten. Während die eine Seite die globale Erderwärmung als ein natürliches Phänomen im Rahmen klimatischer Schwankungen ansieht, macht die Mehrzahl der Klimaforscher

²¹ Onlinequelle: BVL (2012)

²² Vgl. world energy outlook (2006), S. 493

²³ Vgl. Bretzke & Barkawi (2010), S. 30

²⁴ Vgl. Wallentowitz et al. (2010), S. 28

²⁵ Vgl. Bretzke & Barkawi (2010), S. 31 ff.

den Treibhauseffekt dafür verantwortlich.²⁶ Dieser Effekt wird dabei auf die Eigenschaften von Gasen zurückgeführt, die unterschiedliche elektromagnetische Strahlungen bei verschiedenen Wellenlängen durchlassen, wobei die sogenannten Treibhausgase für kurzwellige Strahlungen eine leichtere Durchlässigkeit besitzen, als für langwellige Strahlungen. In Bezug auf die Erdatmosphäre bedeutet dies, dass kurzwellige Sonnenstrahlungen ohne Probleme durch die Treibhausgase hindurch gelangen, jedoch für die von der Erde rückreflektierenden langwelligeren Strahlungen relativ undurchlässig sind und dadurch von der Atmosphäre stärker absorbiert werden, die schließlich Energien in Form von Wärme freisetzen.²⁷ Der Treibhauseffekt kann dabei zunächst als ein natürliches Phänomen betrachtet werden, der die Erde überhaupt erst bewohnbar macht, der jedoch über Generationen hinweg aus dem Gleichgewicht gebracht wurde und in diesem Zustand schwerwiegende Folgen mit sich bringt.²⁸ So beeinflusst der Klimawandel primär die Höhe des Meeresspiegels, Ökosysteme, das Ausmaß von Wetterextremen und vor allem die menschliche Gesundheit.²⁹

Von besonderer Bedeutung im Rahmen des Klimawandels ist dabei das Kohlenstoffdioxid (CO₂), das eins der wirksamsten Treibhausgase darstellt und seit Beginn des Industriezeitalters sprunghafte Anstiege verzeichnen konnte und somit seither einen großen Einfluss auf die weltweite Klimaentwicklung einnimmt.³⁰ Da der Transportsektor für ca. 23 % der globalen CO₂-Emissionen verantwortlich ist, sollte allein dieser Umstand ausreichen, um eine entsprechende Motivation für die Implementierung nachhaltiger Lösungen in der Logistik zu liefern.

2.2.3 Politische Interventionen

In Anbetracht der bereits verkündeten Selbstverpflichtung ganzer Nationen auf strikte Ziele der Emissionssenkung (wie das Kyoto-Protokoll, der G8-Gipfel in L'Aquila, EU-Beschlüsse und weiteren Direktiven), besteht spätestens nach dem Kopenhagener Klimagipfel kein Zweifel mehr daran, dass die Politik in Zukunft sich massiver in das Wirtschaftsgeschehen einmischen wird. So hat sich die EU beispielsweise bereits schon selbst verpflichtet, ihre CO₂-Emissionen bis zum Jahr 2020 (gegenüber 1990) um 20% zu verringern.³¹ Klimaschützer warnen schon lange über die Gefahren erhöhter Emissionswirkungen, die letztendlich auch die politischen Ebenen erreicht haben. Ob diese mit ihren neuesten Klimamodellen auch in der Zukunft in Recht bleiben werden, ist ein anderes Thema, nichtsdestotrotz geht die Politik von einer schlechten Entwicklung für die Umwelt aus und beschäftigt sich eher mit der Fragestellung, wie sich Belastungen der Umwelt vermindern, idealerweise sogar komplett vermeiden lassen, als mit der Analyse unterschiedlicher Behauptungen zum Thema Ökologie.³² Dazu stehen ihr ganz unterschiedliche Handlungsfelder und Maßnahmen zur Verfügung, die „von rigiden Ver- und Geboten über Kontingentierungen bis zu preislichen Anreizsystemen, von der Subventionierung erneuerbarer Energien bis hin zur Internalisierung externer Kosten des Transportes über Mautgebühren oder Emissionszertifikate“³³ reichen und auch die Logistik in ihrer Gesamtheit betreffen. Egal welche politischen Entscheidungen als Gegenmaßnahme zu dieser

²⁶ Vgl. Wallentowitz et al. (2010), S. 3 f.

²⁷ Vgl. ebenda, S. 4

²⁸ Vgl. Bretzke & Barkawi (2010), S. 8

²⁹ Vgl. Stangner (2010), S. 38

³⁰ Vgl. Wallentowitz et al. (2010), S. 4 ff.

³¹ Vgl. Bretzke & Barkawi (2010), S. 40

³² Vgl. Philip (2009), S. 50 ff.

³³ Bretzke & Barkawi (2010), S. 41

Problematik getroffen werden, Logistikunternehmen werden allesamt stark davon betroffen sein, weshalb auch dieses ein wichtiger Beweggrund sein sollte, sich für eine nachhaltigere Logistik zu entscheiden.

2.3 Die Messbarkeit von Nachhaltigkeit

Fest steht, dass sich Nachhaltigkeit nicht direkt messen lässt, indem etwa ein Meterstab an die Vernunft gelegt wird oder man die ökologische, ökonomische und soziale Rücksicht mit der Waage abwägt. Dementsprechend existiert genauso wenig ein Kilo oder ein Meter Nachhaltigkeit. Dennoch haben sich in der Anwendung verschiedene Ansätze zur Messbarkeit von Nachhaltigkeitswirkungen entwickelt, die meist mit Mess- und Schätzproblematiken verbunden sind, die für eine realitätsnahe Abbildung gelöst werden müssen.³⁴ Als ein solides Werkzeug zur Messung von Zustand und Entwicklung von Nachhaltigkeit hat sich dabei in erster Linie die Verwendung sogenannter *Indikatoren* durchgesetzt, bei dem es sich um messbare Kennwerte handelt, die sich auf verschiedene Handlungsfelder beziehen und dadurch Nachhaltigkeitswirkungen quantifizierbar machen.³⁵ So können beispielsweise die CO₂-Emissionen pro Jahr als ein Indikator für das Handlungsfeld Umweltschutz angenommen oder die Arbeitslosenquote für die Bestimmung sozialer Nachhaltigkeitsentwicklungen herangezogen werden.³⁶ Als bedeutsames Beispiel für die Verwendung solcher Kennzahlen ist an dieser Stelle vor allem das Projekt *MONET* (Monitoring der nachhaltigen Entwicklung) in der Schweiz zu nennen, welches ein umfassendes Indikatorensystem mit insgesamt 164 Indikatoren zu 26 Themen in Bezug auf die drei Säulen der Nachhaltigkeit entwickelt hat und dadurch eine regelmäßige Berichterstattung über Stand und Verlauf der nachhaltigen Entwicklungen im Land erlaubt.³⁷

Auf eine Einführung eines Indikatorensystems im Rahmen dieser Bachelorarbeit wird dabei verzichtet, da dieses den Rahmen der Arbeit sprengen würde, zumal die direkte Messung von Nachhaltigkeitsentwicklungen nicht Gegenstand dieser Arbeit ist. Dem aufgespannten Kontext entsprechend, kann beispielsweise hier die Reduktion der CO₂-Emissionen vereinfacht über den Kraftstoffverbrauch der elektromobilen Antriebskonzepte reguliert und gemessen werden, da diese unmittelbar davon abhängen.

2.4 Zwischenfazit

Die in diesem Kapitel erläuterten Änderungen in den Rahmenbedingungen führen zwangsläufig zu der Erkenntnis, dass der konventionelle Antrieb mit Verbrennungsmotor nicht zukunftsträchtig sein wird. Nach derzeitigem Stand der Technik versprechen dabei insbesondere alternative Antriebssysteme einen effizienteren Energieeinsatz, der mit einer zunehmenden Elektrifizierung des Antriebsstranges einhergeht, weshalb im folgenden Kapitel 3 die elektromobilen Antriebskonzepte als eine mögliche operative Lösung für den Straßengüterverkehr vorgestellt werden.

³⁴ Vgl. Bretzke & Barkawi (2010), S. 47 f.

³⁵ Vgl. Grunwald & Kopfmüller (2012), S. 59 ff.

³⁶ Vgl. Onlinequelle: VISUM (2012)

³⁷ Vgl. Onlinequelle: BAFU (2003)

3 Elektromobile Antriebskonzepte für einen effizienteren Energieeinsatz

In diesem Kapitel werden die elektromobilen Antriebskonzepte als eine mögliche operative Lösung für den Straßengüterverkehr vorgestellt. Einleitend soll zunächst der E-Mobility Begriff genauer beleuchtet werden, um anschließend näher auf die einzelnen Stufen des elektrifizierten Antriebsstranges einzugehen, um daraufhin über die wichtigste Kernkomponente für die zukünftige Weiterentwicklung und Akzeptanz elektromobiler Antriebskonzepte, dem Energiespeicher, auf die Einsatzmöglichkeiten im logistischen Anwendungsfeld zu schließen.

3.1 Abgrenzung und Definition des E-Mobility Begriffs

Grundlage jeder Bewegung und somit der Mobilität von Fahrzeugen oder anderen Verkehrsträgern ist die Nutzung von Energie, die entweder aus erschöpflichen oder unerschöpflichen Quellen stammt. Die Bereitstellung von Energie bei einem konventionell betriebenen Fahrzeug erfolgt durch die Verbrennung von Kraftstoff.³⁸ Der Verbrennungsmotor wandelt dabei chemisch gebundene Energie (Brennstoff) in Wärme und anschließend in mechanische Energie um, wobei eine periodische Verbrennung in einem oder mehreren Zylindern stattfindet und die für den Antrieb erforderlichen Arbeitskolben in den Zylindern in Bewegung setzt.³⁹ Bei einem elektroangetriebenen Fahrzeug hingegen erfolgt die Umwandlung in mechanische Energie direkt. Der elektrische Strom wird aus einem externen Speichermedium (Batterie) bezogen und mit Hilfe eines Elektromotors ohne Umwege mechanisch verwertet.⁴⁰ Somit erfolgt bei einem Elektromotor keine Zündung von Kraftstoff, um mögliche Antriebskräfte zu erzeugen.⁴¹ Beiden Antriebslösungen ist dabei gemein, dass sie ihre Fahrenergie, durch Zwischenspeicherung oder einer Zwischenumwandlung, aus einer vorgestuften Primärenergiequelle beziehen.⁴²

Um den Einstieg in das Gebiet der Elektromobilität zu vereinfachen und ein grundsätzliches Verständnis dafür zu schaffen, inwiefern sich elektromobile Antriebskonzepte von konventionell angetriebenen Fahrzeugen oder Verkehrsträgern abgrenzen lässt, gilt es zunächst Unterschiede, Gemeinsamkeiten und mögliche Schnittstellen beider Antriebsarten aufzuzeigen. Ausgehend von dieser Betrachtung kann dann festgestellt werden, wie die Elektromobilität im Kontext dieser Arbeit zu klassifizieren und nach Möglichkeit, zu definieren wäre. Die nachfolgende Abbildung 2 zeigt dazu, die energetische Prozesskette von der Primär- bis hin zu der benötigten Fahrenergie, mit den jeweils zwischengeschalteten Energiewandlungs- und Speichermechanismen:

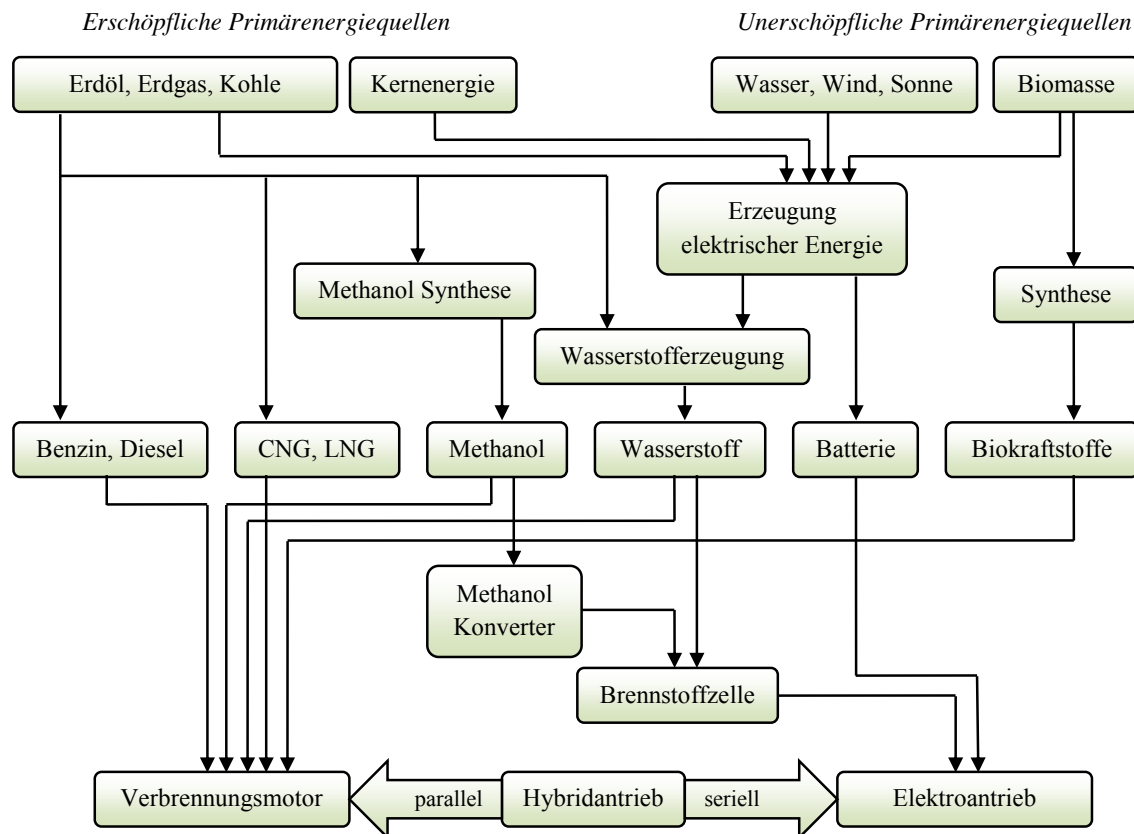
³⁸ Vgl. Klauke (2009), S. 3

³⁹ Vgl. Stangner (2010), S. 45

⁴⁰ Vgl. Heitland (2006), S. 118

⁴¹ Vgl. Stangner (2010), S. 46

⁴² Vgl. Naunin (2007), S. 20

Abbildung 2: Die energetische Prozesskette⁴³

Eine erste Einteilung für das jeweilige Antriebskonzept erfolgt somit über die Wahl der Primärenergie, die jeweils über verschiedene Energiewandlungen und -speicherungen, letztendlich zu der gewünschten Betriebs- oder Fahrenergie führt. Dabei ist anzumerken, dass die elektrische Energie lediglich von einer Brennstoffzelle oder einem externen Gerät, wie der Batterie, geliefert werden kann, um eine abgasfreie Bewegung des gewünschten Objekts zu gewährleisten.⁴⁴ Deutlich wird aber auch, dass die Entladung der Batterie zwar emissionslos abläuft, aber dennoch eine indirekte Schadstoffausschüttung erfolgen kann, wenn der Energieinhalt der Batterie aus fossilen Brennstoffen entstammt und sich bereits in den Vorstufen der Prozesskette CO₂-Emissionen angereichert haben.⁴⁵ Letztendlich existieren gemäß Abbildung 2 am Ende der Energiewandlungskette prinzipiell drei verschiedene Antriebssysteme:

- der konventionelle Antrieb mit einem Verbrennungsmotor,
- der Hybridantrieb als Kombination zweier Kraftquellen und
- der reine Elektroantrieb.

Die Brennstoffzelle ist nach dieser Darstellung nicht als eigenständiger Antrieb einzuordnen, da es sich hierbei um ein Energiewandlungssystem handelt, die durch Zusammenführen von Wasserstoff und Sauerstoff elektrische Energie erzeugt und erst durch Zuhilfenahme eines Elektroantriebs die

⁴³ In Anlehnung an Naunin (2007), S. 20

⁴⁴ Vgl. Naunin (2007), S. 20

⁴⁵ Vgl. Klauke (2009a), S. 24

benötigte mechanische Energie bereitstellt.⁴⁶ Ausgehend von den diesen Erkenntnissen, umfasst der Begriff der Elektromobilität somit alle Fahrzeuge und Transportmittel, die ganz oder nur teilweise mit elektrischer Energie angetrieben werden und zur Beförderung von Personen oder Waren dienen. Dazu gehören reine Elektro-, als auch antriebskombinierte Hybridfahrzeuge.⁴⁷

3.2 Elektromobile Antriebskonzepte

Wo genau die Trennlinie zwischen einem Hybrid- und einem Elektrofahrzeug liegt, lässt sich schwer sagen, da der Übergang meist in Grauzonen erfolgt.⁴⁸ Fest steht, dass nach jahrelanger Entwicklung und Optimierung des konventionellen Verbrennungsmotors im Hintergrund stetig steigender Ölpreise und endlicher fossiler Brennstoffe, die zunehmende Elektrifizierung des Antriebsstranges sich als das Hauptpfad zukünftiger Mobilität herauskristallisiert hat.⁴⁹ Als die wichtigsten Übergangstechnologien auf diesem Weg zum absolut umweltfreundlichen Antriebskonzept gelten dabei die Hybridsysteme, die den schrittweisen Paradigmenwechsel vom Verbrennungsmotor bis hin zum reinen Elektroantrieb ermöglichen. Je nach Grad der Elektrifizierung wird heute zwischen einem Micro-, Mild- und Full-Hybridsystem unterschieden, wobei an dessen Ende der rein elektrische Antrieb steht.⁵⁰ Die nachfolgende Abbildung 3 zeigt hierzu die zunehmende Elektrifizierung des Antriebsstranges mit ihren jeweiligen Zwischenstufen:

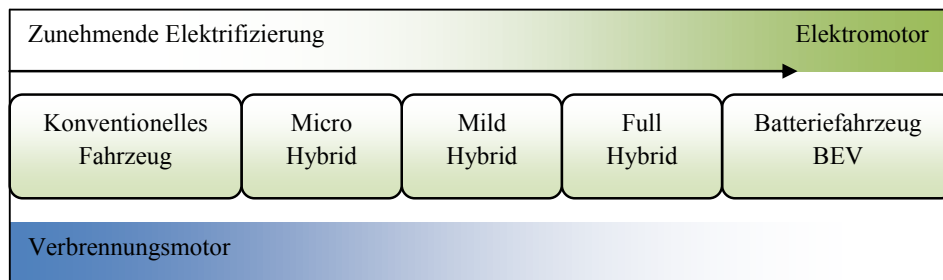


Abbildung 3: Zunehmende Elektrifizierung des Antriebsstranges

3.2.1 Micro-Hybrid

Die niedrigste Stufe der Elektrifizierung des Antriebsstranges stellt das sogenannte Micro-Hybrid-System dar. Charakteristisch für dieses Antriebskonzept ist dabei die Substitution der Lichtmaschine und Anlasser durch einen leistungsfähigen Starter-Generator, der entweder über einen Riemenbetrieb mit dem Verbrennungsmotor gekoppelt oder direkt auf den Antriebsstrang angeflanscht wird.⁵¹ Somit verfügt ein Micro-Hybrid über eine Start/Stopp-Funktion, die den Motor bei Stillstand automatisch ausschaltet, sobald sich das Fahrzeug (mit Schaltgetriebe) im Leerlauf befindet und gleichzeitig die Kupplung nicht betätigt wird. Um die Fahrt fortzusetzen, genügt ein kurzes Treten auf die Kupplung, um den Motor über die Steuerungselektronik erneut zu starten. Bei einem Automatikgetriebe hingegen schaltet sich der Motor bei betätigter Bremse nach einer vordefinierten Zeit selbstständig ab und startet

⁴⁶ Vgl. Klauke (2009), S. 4

⁴⁷ Vgl. Hofer (2006), S. 5 & Yay (2010), S. 41

⁴⁸ Vgl. Klauke (2009a), S. 26

⁴⁹ Vgl. Wallentowitz et al. (2010), S. 52

⁵⁰ Vgl. Dannenberg & Assadi (2011), S. 11

⁵¹ Vgl. Wallentowitz et al. (2010), S. 54

beim Lösen der Fußbremse erneut.⁵² Dieser Funktion steht auch das Bremsenergie-Rückgewinnungs-System unterstützend zur Seite, indem es die Bewegungsenergie des Fahrzeugs bei Bremsvorgängen und Unterlassung der Gaszufuhr abfängt und in einen Akkumulator speichert, um die rückgewonnene Energie für das Starten des Motors zu nutzen. Durch die Kombination des Start/Stop-Systems mit der Bremsenergie-Rückgewinnung, können Micro-Hybride Kraftstoffeinsparungen von 5 % bis 10 % realisieren.⁵³ Besonders groß ist die Ausbeute dabei im Misch- und Stadtverkehr, welches ein häufiges Halten und Anfahren zur Folge hat, wobei eine Amortisierung schon ab einer Standzeit von vier Sekunden stattfindet.⁵⁴ Die nachfolgende Tabelle 1 hebt alle wichtigen Besonderheiten eines Micro-Hybriden hervor:

Charakteristika:	Starter-Generator ersetzt Lichtmaschine + Anlasser
Funktionen:	Start/Stop mit Schnellstart bzw. Hochdrehzahlstart
Kraftstoffeinsparung:	Ca. 5 % bis 10 %
Fahrverhalten:	Unverändert, lediglich kein Laufgeräusch im Stand
Sekundär Vorteile:	Hohe Generatorleistung für Bordnetzversorgung
Beispiel:	Ford Hytrans (Nutzfahrzeug)

Tabelle 1: Datenblatt Micro-Hybrid⁵⁵

Da der reine Antrieb des Fahrzeugs mit dem Startergenerator nicht möglich ist und es auch keinen nennenswerten Anteil zur Fahrleistung beisteuert, zählen viele Kritiker den Micro-Hybrid nicht zu den Hybridantrieben.⁵⁶ Auf der anderen Seite stellt es die niedrigste Stufe der Elektrifizierung dar und hält auch weitere Kerngrößen wie Kosten oder Mehrgewicht bei gleichzeitig geringem Aufwand niedrig. Außerdem ist der Ausbau der Fahrzeuge auf einen höheren Grad der Elektrifizierung bis hin zum Vollhybrid jederzeit problemlos möglich.⁵⁷

3.2.2 Mild-Hybrid

Der Mild-Hybrid stellt die nächste Erweiterungsstufe der Elektrifizierung des Antriebsstranges dar und verfügt neben der Start/Stop-Funktion und der Bremsenergie-Rückgewinnung zusätzlich eine Beschleunigungsunterstützung, die als *Boosten* bezeichnet wird. Die rückgewonnene Energie wird dabei nicht nur beim Motorstart genutzt, sondern unterstützt den Verbrennungsmotor auch bei Beschleunigungsvorgängen. Dazu kann der Elektromotor bei Bedarf zugeschaltet werden, der das Fahrzeug mit zusätzlichen Antriebsmomenten versorgt und die Fahrleistung, besonders in niedrigen Drehzahlbereichen, deutlich verbessert.⁵⁸ Die E-Maschine ist, wie bei den Micro-Hybriden auch, entweder über einen Riemen mit dem Verbrennungsmotor gekoppelt oder wird direkt auf den Antriebsstrang angeflanscht, während meist immer eine direkte und starre Verbindung mit der Kurbelwelle bevorzugt wird, um gegenüber dem Riemenbetrieb, ein höheres Drehmoment zu erzeugen. Dadurch ergibt sich ein insgesamt höherer Gesamtwirkungsgrad mit einem verbesserten Startverhalten in einem nahezu verschleißfreien System, welches gegenüber konventionellen

⁵² Vgl. Matz & Elsässer (2009), S. 58

⁵³ Vgl. Wallentowitz et al. (2010), S. 54

⁵⁴ Vgl. Matz & Elsässer (2009), S. 58

⁵⁵ In Anlehnung an Voß (2005), S. 128

⁵⁶ Vgl. Voß (2005), S. 128

⁵⁷ Vgl. Yay (2010), S. 44

⁵⁸ Vgl. Wallentowitz et al. (2010), S. 54 f.

Antrieben, Kraftstoffeinsparungen bis zu 20 % realisieren kann.⁵⁹ Tabelle 2 hebt die Besonderheiten eines Mild-Hybriden hervor:

Charakteristika:	Starter-Generator und Beschleunigungsunterstützung
Funktionen:	Start/Stop mit Schnellstart und <i>Boost</i> -Funktion
Kraftstoffeinsparung:	Ca. 10 % bis 20 %
Fahrverhalten:	Verbesserung im Ansprech- und Lastwechselverhalten
Sekundärvorteile:	Ggf. riemenloser Motor möglich
Beispiel:	Toyota Coaster (Nutzfahrzeug)

Tabelle 2: Datenblatt Mild-Hybrid⁶⁰

Wie beim Micro-Hybrid ist auch beim Mild-Hybrid der Elektromotor als alleiniger Antriebsmotor nicht zu verwenden. Er dient lediglich als Anlasser, Lichtmaschine und zur Unterstützung des Verbrennungsmotors.⁶¹ In Bezug auf verschiedene Bauteile und Komponenten erfordert der Mild-Hybrid u.a. auch zusätzlich leistungsfähigere Energiespeicher sowie Steuergeräte für das Batteriemanagement und für die Abstimmung der verschiedenen Betriebszustände.⁶²

3.2.3 Full-Hybrid

Der Full-Hybrid besitzt in seiner Antriebsstruktur ebenfalls über alle Krafteinsparungstechniken, wie sie auch im Micro- und Mild-Hybrid vorkommen. Die technische Besonderheit dieser Elektrifizierungsstufe liegt darin, dass der eingebaute Elektromotor nun in der Lage ist, ohne Zuhilfenahme des Verbrennungsmotors, selbstständig das Fahrzeug zu bewegen.⁶³ Um längere Strecken rein elektrisch bewältigen zu können, bedarf es deshalb im Vergleich zu Micro- und Mild-Systemen Akkumulatoren mit einer leistungsfähigeren Kapazität, weshalb hier die größte technische Herausforderung in der Batterietechnik liegt.⁶⁴ Das Zusammenwirken und die Kopplung der beiden Antriebsaggregate können dabei, je nach Fahrzeugtyp, Verwendungszweck und Nutzungscharakteristik, verschiedene Formen annehmen. In der Praxis existieren viele verschiedene Kombinationsmöglichkeiten, deren vollständige Erläuterung in dem verfügbaren Rahmen dieser Arbeit leider nicht möglich ist, weshalb im Folgenden auf die aussichtsreichsten Varianten, dem *seriellen*, *parallelen* und *leistungsverzweigten Full-Hybrid*, eingegangen wird.

Beim *seriellen* Hybrid ist der Elektromotor direkt an den Antriebsstrang gekoppelt und liefert dem Fahrzeug die gesamte Fahrenergie, während der Verbrennungsmotor zeitweise über einen Generator Strom produziert und die E-Maschine erst dann mit elektrischer Energie versorgt, sobald die Batteriekapazität ihre Grenze erreicht hat. Dadurch ist es möglich, ein hohes Maß an Kraftstoff einzusparen, weil zum einen rein elektrisches und emissionsfreies Fahren bis zum Zuschalten des Verbrennungsmotors möglich ist und zum anderen der Verbrennungsmotor jederzeit im optimalen Betriebspunkt arbeitet, da Leistungsspitzen durch die Batterie kompensiert werden.⁶⁵ Auf seine Grenzen stößt der serielle Full-Hybrid, sobald auf längeren Strecken höhere Leistungen gefordert sind.

⁵⁹ Vgl. Wallentowitz et. al. (2010), S. 55 & Voß (2005), S. 128

⁶⁰ In Anlehnung an Voß (2005), S. 129

⁶¹ Vgl. Matz & Elsässer (2009), S. 58

⁶² Vgl. Wallentowitz et. al. (2010), S. 55

⁶³ Vgl. Matz & Elsässer (2009), S. 59

⁶⁴ Vgl. Wallentowitz et. al. (2010), S. 55

⁶⁵ Vgl. ebenda, S. 57

Der *parallele* und *leistungsverzweigte* Hybrid unterscheiden sich von der seriellen Antriebsstruktur dadurch, indem sie eine direkte Verbindung zum Antriebsstrang aufweisen. Im parallelen System arbeiten E-Maschine und Verbrennungsmotor wahlweise zusammen oder unabhängig voneinander und ermöglichen so ein lokal emissionsfreies Fahren, indem die jeweilige Fahrsituation über die eingesetzte Antriebskomponente entscheidet. Die leistungsverzweigte Hybridstruktur arbeitet ähnlich, wobei hier die beiden Antriebskomponenten über ein sogenanntes *Planetengetriebe* miteinander gekoppelt sind, welches den Wechsel von konventionellem Antrieb auf Elektrobetrieb und umgekehrt kaum bemerkbar macht und in ihrer Gesamtheit ein stufenloses Getriebe darstellt.⁶⁶ Tabelle 3 listet die Besonderheiten eines Full-Hybrid-Systems auf:

Charakteristika:	Ausführung als Seriell-, Parallel- oder Leistungsverzweigt
Funktionen:	Optimale Rekuperation und starke Boostwirkung durch Energiespeicher
Kraftstoffeinsparung:	Ca. 20 % bis 30 %
Fahrverhalten:	Sehr gutes Rangier/Stop-And-Go-Komfort durch elektrisches Fahren
Sekundärvorteile:	Optimales Hybrid-Image
Beispiel:	Volvo FE (Nutzfahrzeug)

Tabelle 3: Datenblatt Full-Hybrid⁶⁷

Mit den derzeitigen Full-Hybrid-Antriebskonzepten können in der Regel heute schon Krafteinsparungen bis zu 30 % realisiert werden. Eine Weiterentwicklung des Full-Hybriden Systems stellen zurzeit die sogenannten *Plug-In-Hybride* dar, mit denen sogar eine Kraftstoffreduktion bis zu 40 % gelingt. Dabei handelt es sich um gewöhnliche Full-Hybride, mit der zusätzlichen Funktion, die mitgeführte Batterie über eine Ladeschnittstelle zu laden. Diese haben meist leistungsstärkere Batterien, die somit längere Strecken rein elektrisch bewältigen können und somit ein höheres Kraftstoffeinsparpotenzial aufweisen.⁶⁸ Zusätzlich dazu können Full-Hybride mit einem sogenannten *Range Extender* (auch Reichweitenverlängerer) ausgestattet sein, die durch zusätzliche Aggregate die elektrische Reichweite erhöhen.

3.2.4 Reines Elektrofahrzeug (BEV)

Bei einem rein elektrisch betriebenen Antriebskonzept entfällt, gegenüber den bereits vorgestellten Systemen, der gesamte Verbrennungsmotor mit Treibstofftank und ihrer Abgasanlage.⁶⁹ Dadurch besitzen sogenannte BEVs (*Battery Electric Vehicle*) einen relativ einfachen Systemaufbau, die sich aus den Kernkomponenten Energiespeicher, Elektromotor und eventuell mehrerer Steuergeräte zusammensetzt. Ist die Anordnung im Antriebsstrang darüber hinaus als Radnabenantrieb ausgelegt, entfällt in den meisten Fällen sogar das Differentialgetriebe.⁷⁰

Reine Elektrofahrzeuge fahren lokal emissionsfrei und sind während ihres Betriebes absolut umweltfreundlich, wobei ihr Schadstoffausstoß von dem verwendeten Strommix abhängt. Demnach kann die Entladung der Batterie zwar emissionslos ablaufen, aber dennoch eine indirekte Umweltbelastung stattfinden, wenn der bereitgestellte Strom in der Batterie nicht auf Basis

⁶⁶ Vgl. Wallentowitz et al. (2010), S. 56 f.

⁶⁷ In Anlehnung an Voß (2005), S. 131

⁶⁸ Vgl. Stangner (2010), S. 53

⁶⁹ Vgl. Schuler (2011), S. 25

⁷⁰ Vgl. Wallentowitz et al. (2010), S. 59

regenerativer Energien erzeugt wurde.⁷¹ Durch die Verwendung erneuerbarer Energien hingegen stellt das BEV ein absolut umweltfreundliches Antriebskonzept mit einer hundertprozentigen Kraftstoffeinsparung dar. Die nachfolgende Tabelle 4 stellt die Besonderheiten eines reinen Elektrofahrzeugs zusammen:

Charakteristika:	Ausführung als Seriell-, Parallel- oder Leistungsverzweigt
Funktionen:	Optimale Rekuperation und starke Boostwirkung durch Energiespeicher
Kraftstoffeinsparung:	100 %
Fahrverhalten:	Nahezu geräuschloses Fahren
Sekundärvorteile:	Optimales Image
Beispiel:	Mercedes-Benz Vito E-Cell (Nutzfahrzeug)

Tabelle 4: Datenblatt reines Elektrofahrzeug (BEV)

Dabei muss ein BEV ihre elektrische Energie nicht zwingend aus einer mitgeführten Batterie beziehen. An dieser Stelle sind auch weitere Konzepte denkbar, indem die Energieversorgung beispielsweise durch Solarzellen oder Oberleitungen realisiert wird. Da aber Oberleitungen die Bewegungsfreiheit stark einschränken und Solarzellen durch niedrige Wirkungsgrade nicht effektiv genug sind, wird in der Praxis vermehrt die Anwendung mitgeführter Akkumulatoren genutzt.

3.3 Energiespeicher als Kernkomponente

Während Schienenfahrzeuge oder andere Oberleitungsvehikel ihre elektrische Energie direkt aus einem Fahrdrat entnehmen, greifen Straßenfahrzeuge auf einen mobilen Energiezwischenspeicher zurück, welches durch ein Batteriesystem realisiert wird. Der Energiespeicher gilt dabei als die wichtigste Kernkomponente für die zukünftige Weiterentwicklung und Akzeptanz elektromobiler Antriebskonzepte, da es maßgebend über die Leistungsfähigkeit des jeweiligen Fahrzeugs, gemessen an der Reichweite, entscheidet.⁷² Trotz intensiven Forschungsarbeiten und fortschreitender Technik im Bereich elektrochemischer Speichermodule, haben die Energiespeicher ihre vollständige Marktreife noch nicht erreicht und stellen weiterhin den größten Schwachpunkt im elektromobilen Antriebsstrang dar.⁷³ Bis zum heutigen Zeitpunkt ist noch nicht klar, welche Technologie sich endgültig durchsetzen wird, da verschiedene Energiespeicher in unterschiedlichen Bereichen ihre Vor- und Nachteile aufweisen. Daher wird im Folgenden zunächst auf die allgemeinen Anforderungen an Batteriesysteme eingegangen, um anschließend die derzeit bedeutendsten Energiespeicher in elektromobilen Antriebskonzepten mit ihren jeweiligen elektrischen Reichweiten aufzuzeigen, welches unmittelbar für die daran anschließende Beurteilung der Einsatzmöglichkeiten im logistischen Anwendungsfeld eine große Rolle spielt.

3.3.1 Anforderungen an Energiespeicher

An die Energiespeicher im Elektrofahrzeug werden hohe Anforderungen gestellt, dessen Erfüllung gleichzeitig über den Erfolg dieser Antriebskonzepte entscheidet. Erst durch leistungsfähige Energiespeicher mit einer hohen Energiedichte ist es beispielsweise möglich, Reichweiten zu erzielen, die in der praktischen Anwendung mit verbrennungsmotorisch angetriebenen Konzepten vergleichbar

⁷¹ Vgl. Yay (2010), S. 48

⁷² Vgl. Harvey (2009), S.11 & Peren et al. (1997), S. 27

⁷³ Vgl. Peren et al. (1997), S. 27

sind.⁷⁴ Darüber hinaus muss ein Energiespeicher über eine hohe Lebensdauer verfügen, um kostspielige Austauschaktionen in der Zukunft zu vermeiden. Diese wird üblicherweise über die Anzahl der Ladezyklen beschrieben, wobei eine Nutzungsdauer von mindestens 10 Jahren gefordert wird.⁷⁵ Weitere wichtige und nicht zu vernachlässigende Parameter sind die Aspekte der Sicherheit und Kosten, während letzteres im Zielkonflikt zur energetischen Qualität steht. Demnach kann jede technische Optimierung die spezifischen Kosten nach oben treiben oder umgekehrt Einbußen im Systemnutzungsgrad sich positiv auf die Wirtschaftlichkeit auswirken.⁷⁶ Die nachfolgende Abbildung 4 zeigt die geforderten Anforderungen an Energiespeicher im Spannungsfeld der Batterietechnik:

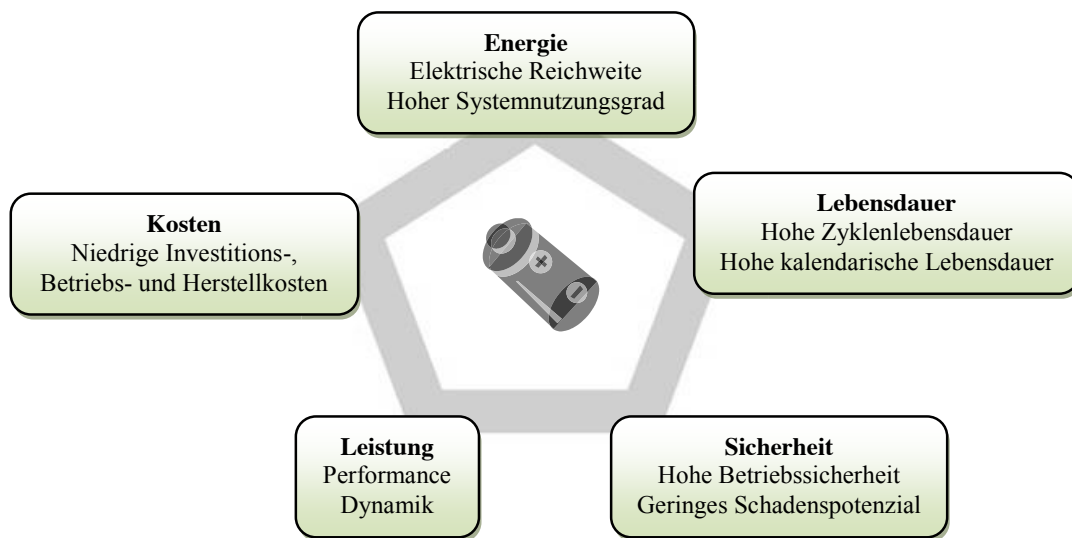


Abbildung 4: Anforderungen an Energiespeicher⁷⁷

3.3.2 Relevante Energiespeicher und realisierbare Reichweiten

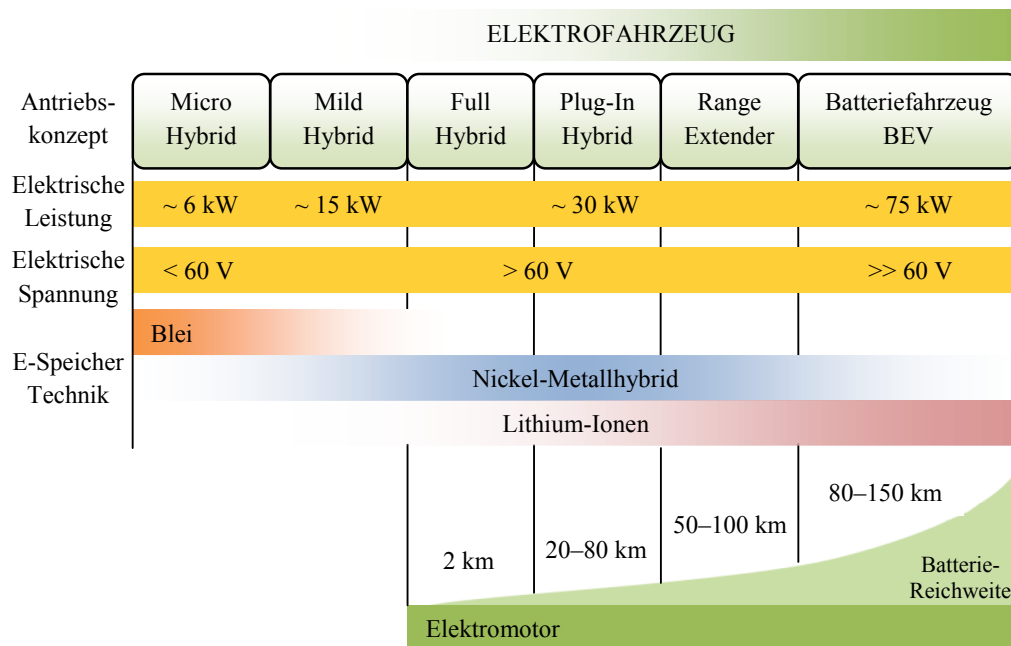
Im Folgenden wird auf die wichtigsten Energiespeicher für elektromobile Antriebskonzepte eingegangen. In dieser Hinsicht sind dabei Blei-, Nickel-Metallhydrid- und Lithium-Ionen-Akkumulatoren von großer Relevanz, die in der folgenden Abbildung 5 mit ihren technischen Daten und den realisierbaren Batterie-Reichweiten im jeweiligen Antriebskonzept gegeben sind und nachfolgend näher beschrieben werden.

⁷⁴ Vgl. Harvey (2009), S. 11

⁷⁵ Vgl. Naunin (2007), S. 35

⁷⁶ Vgl. Neupert (2009), S. 33

⁷⁷ In Anlehnung an Onlinequelle: Oelschläger, H. (2010), S. 25

Abbildung 5: Energiespeicher in E-Konzepten und ihre Reichweiten⁷⁸

Blei-Akkumulatoren können auf eine lange Entwicklungshistorie zurückblicken und gelten derzeit als technisch ausgereift, da sie über mehrere Jahrzehnte erprobt und ständig weiterentwickelt wurden. Dennoch eignen sie sich nur bedingt für den Einsatz in Hybrid- und Elektrofahrzeugen, da sie in Bezug auf das Eigengewicht eine sehr geringe Energiedichte aufweisen.⁷⁹ Hinzu kommen sehr lange Ladezeiten sowie ein Rückgang der Energiemenge bei tiefen Temperaturen, weshalb sie mit einem geringen Zukunftspotenzial zu bewerten sind und für die weitere Entwicklung elektromobiler Antriebskonzepte höchstwahrscheinlich keinen zusätzlichen Beitrag leisten werden.⁸⁰

Nickel-Metallhydrid-Akkumulatoren bildeten bisher den Standard für Energiespeicher in Elektrofahrzeugen. Ihre Vorteile liegen in einer guten Zyklenfestigkeit mit einer gesteigerten Energiedichte, wobei zusätzlich die gesamten Zellen der Batterie aus ungiftigen Materialien bestehen. Zudem besitzen sie über eine Schnellladefähigkeit, die die Anwendung besonders in elektromobilen Antriebskonzepten interessant macht.⁸¹ Ihr Zukunftspotenzial ist jedoch mangels weiterer Optimierungsmöglichkeiten in Bezug auf die Batteriekapazität begrenzt, weshalb diese Technologie stetig an Attraktivität verliert.⁸²

Lithium-Ionen-Akkumulatoren werden derzeit das höchste Entwicklungspotenzial zugesprochen und stellen technisch die vielversprechendste Batterietechnologie im Elektrofahrzeug dar.⁸³ Sie weisen im Vergleich zu ähnlichen Energiespeichern eine sehr hohe Energiedichte auf, mit denen längere Distanzen rein elektrisch bewältigt werden können, ohne die Aspekte der Sicherheit und Lebensdauer

⁷⁸ In Anlehnung an Onlinequelle: Oelschläger, H. (2010), S. 24

⁷⁹ Vgl. Matz & Elsässer (2009), S. 50

⁸⁰ Vgl. Hofer (2006), S. 37

⁸¹ Vgl. Rummich (2008), S. 159

⁸² Vgl. Wallentowitz et al. (2010), S. 89

⁸³ Vgl. Hofmann (2010), S. 164

zu vernachlässigen, weshalb die zukünftige Chance elektromobiler Antriebskonzepte unmittelbar auch von der Entwicklung dieser Technologie abgemacht werden kann.⁸⁴

3.4 Einsatzbereiche im Straßengüterverkehr

Da die Betrachtung, dem aufgespannten Kontext entsprechend, sich lediglich auf den Straßengüterverkehr beschränkt, hängt der Einsatzbereich elektromobiler Antriebskonzepte im logistischen Anwendungsfeld, von der jeweiligen Länge der Lieferwege und dem Gewicht der Transporttechnologie ab. Tendenziell kann dabei gesagt werden, dass die Sinnhaftigkeit elektrischen Fahrens mit steigender Reichweite und steigendem Fahrzeuggewicht abnimmt.⁸⁵ Oder anders ausgedrückt: eine zunehmende Elektrifizierung des Antriebsstranges erfordert nach derzeitigem Stand der Technik, leichtere Fahrzeuge mit kürzeren Fahrstrecken. Die nachfolgende Abbildung 6 zeigt, entsprechend auf die im vorherigen Abschnitt behandelten Leistungen der Energiespeicher, die verschiedenen Antriebskonzepte mit ihren jeweiligen elektrischen Reichweiten und den daraus resultierenden Einsatzmöglichkeiten im logistischen Straßengüterverkehr:

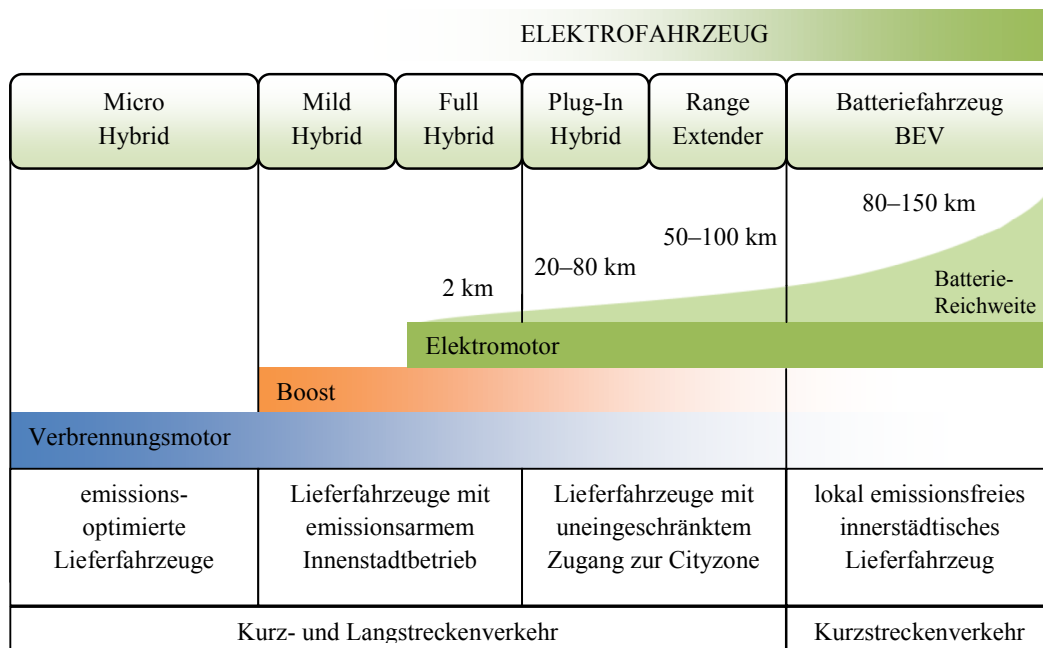


Abbildung 6: Einsatzbereiche der E-Konzepte im Straßengüterverkehr⁸⁶

Aus der Abbildung 6 geht hervor, dass sich hybridisierte Antriebsstrukturen generell sowohl für Lang- als auch für Kurzstrecken eignen. Dieses ist dabei auf das Vorhandensein des Verbrennungsmotors zurückzuführen, der auch längere Distanzen im Fahrbetrieb ermöglicht. Das rein elektrische Batteriefahrzeug (BEV) hingegen, greift für die benötigte Antriebsenergie lediglich auf den Energiespeicher zurück, weshalb es in der Reichweite beschränkter ist und sich derzeit nur für den Kurzstreckenverkehr eignet. Bezogen auf das logistische Anwendungsfeld ist somit der typische

⁸⁴ Vgl. Matz & Elsässer (2009), S. 53ff.

⁸⁵ Vgl. Beidl et. al. (2011), S. 434

⁸⁶ In Anlehnung an Onlinequelle: Oelschläger, H. (2010), S. 20

Einsatzbereich eines BEV's vorwiegend der städtische Güterverkehr in Form von leichten Nutzfahrzeugen, wobei den Hybridantrieben durch die Kombination von Verbrennungs- und Elektromotor, die Belieferung sowohl im Nah- als auch im Fernverkehr gelingt. Inwiefern sich dadurch Einsparpotenziale hinsichtlich der CO₂-Emissionen ergeben, ist Bestandteil des nachfolgenden Kapitels.

4 Potenziale elektromobiler Antriebskonzepte zur Senkung der CO₂-Emissionen

Das vorangegangene Kapitel hat gezeigt, dass die unterschiedliche Auslegung des Antriebsstranges die Höhe der Einsparung beim Kraftstoffverbrauch und der daraus resultierenden Emissionen bestimmt. Dabei wurde auch deutlich, dass sich hybridisierte Antriebsstrukturen (Micro-, Mild-, Full-Hybrid) sowohl für den Fern- als auch für den Nahverkehr eignen, wobei der typische Einsatzbereich eines rein elektrischen Fahrzeuges (BEV) vorwiegend der städtische Güterverkehr bleibt. Inwiefern sich dadurch Einsparpotenziale bezüglich des klimaschädlichen Gases Kohlenstoffdioxid im Straßengüterverkehr für eine insgesamt nachhaltigere Logistik erschließen, zeigen die nächsten Seiten dieses Kapitels. Dazu wird bedingt durch den Einsatzbereich zunächst auf die Einsparpotenziale hybridisierter Antriebsstrukturen eingegangen, da hier eine Betrachtung mehrerer Fahrzeugklassen nötig erscheint, um anschließend das Reduktionspotential rein elektrischer Antriebe am leichten Nutzfahrzeug aufzuzeigen. Das Kapitel schließt dabei mit einer Bewertung der einzelnen elektromobilen Antriebskonzepte in den jeweiligen Fahrzeugklassen hinsichtlich der möglichen CO₂-Einsparpotenziale ab.

4.1 Einsparpotenziale durch hybridisierte Antriebsstrukturen

Im vorangegangenen Kapitel wurde deutlich, dass die Auslegung der Hybridisierung die Höhe der Einsparungen beim Hybridfahrzeug bestimmt, wobei hybride Antriebsstrukturen, im Gegensatz zum rein elektrischen Fahrzeug, sowohl im Kurz- als auch im Langstreckenverkehr eingesetzt werden können. Um nun eine mögliche Beurteilung des Kraftstoffeinsparpotenzials durch eine hybridisierte Antriebsstruktur durchführen zu können, werden im Folgenden drei verschiedene Fahrzeugkategorien eines Logistikdienstleisters betrachtet, um anschließend auf Basis ihrer jeweiligen Einsatzprofile die realisierbaren Kraftstoffersparnisse und somit der gleichzeitig verhinderbaren CO₂-Emissionen abzuschätzen. Die nachfolgende Tabelle 5 liefert hierzu die benötigten Daten bezüglich der zu betrachtenden Fahrzeuge im Straßengüterverkehr:




Fahrzeugklasse	Zul. Gesamtgewicht	Hybridisierung	Einsatzgebiet
Leichtes Nutzfahrzeug N1 	bis unter 3,5 t	Micro – Full	Auslieferung im Nahverkehr
Mittelschwerer LKW N2 	ab 3,5 t bis unter 12 t	Micro – Mild	Auslieferung im Regionalverkehr
Schwerer LKW N3 	ab 12 t	Micro – Mild	Auslieferung im Fernverkehr

Tabelle 5: Hybridantriebe in unterschiedlichen Fahrzeugklassen⁸⁷

Demnach stellt die Fahrzeugklasse N1 das leichte Nutzfahrzeug mit einem zulässigen Gesamtgewicht bis unter 3,5 Tonnen dar und kann im logistischen Anwendungsfeld für Auslieferungen im Nahverkehr eingesetzt werden. Für die Ausprägung der Hybridisierung dieser Fahrzeugklasse kommt

⁸⁷ Fahrzeugbilder aus Onlinequelle: Shell (2010), S. 19

dabei die ganze Bandbreite von Micro- bis zum Full-Hybrid in Frage, da sich leichte Nutzfahrzeuge besonders für eine Elektrifizierung des Antriebsstranges eignen und somit von allen Hybridisierungsstufen profitieren können. Da die Sinnhaftigkeit elektrischen Fahrens mit steigendem Fahrzeuggewicht abnimmt, wird für das mittelschwere N2- und schwere N3-LKW eine Hybridisierung bis zur Mild-Hybrid-Variante angenommen, zumal für solche Gewichtsklassen in diesem Einsatzgebiet die Full-Hybridisierung ohnehin nicht umsetzungsnah erscheint.⁸⁸ Da darüber hinaus das jeweilige Fahrprofil als weitere Einflussgröße auf das Kraftstoffersparnis eine wichtige Rolle spielt, soll im Folgenden auf dieses eingegangen werden, um anschließend das realisierbare Reduktionspotenzial der verschiedenen Hybridisierungsvarianten, bezogen auf die obigen Lieferfahrzeuge, aufzuzeigen. Daran anknüpfend werden auch einige Praxisbeispiele gegeben, die erfolgreiche Anwendungen auf dem derzeitigen Markt behandeln.

4.1.1 Bedeutung und Darlegung der Fahrprofile

Als maßgebliche Einflussgröße auf das Einsparpotenzial, genießt das Fahrprofil des hybriden Fahrzeuges einen hohen Stellenwert bei der Elektrifizierung des Antriebsstranges. Dabei wirkt sich grundsätzlich ein dynamisches Fahrprofil positiv auf das Einsparpotenzial aus, weshalb insbesondere Fahrzeuge mit vorwiegend urbanen Einsatzgebieten sich gut für eine Hybridisierung eignen.⁸⁹ Bezogen auf die in der Logistik eingesetzten Transportmittel, lässt sich dabei der Großteil der Lieferfahrzeuge in zwei Klassen „Verteiler-LKW“ und „Fern-LKW“ aufteilen. Verteiler-LKW werden dabei für die Warenfeinverteilung eingesetzt, weshalb sie ein überwiegend städtisches Einsatzprofil aufweisen, das von einer hohen „Stop-And-Go-Frequenz“ gekennzeichnet ist. Zudem kommen stark wechselnde Beladungen über den Tagesverlauf bei niedrigen Fahrleistungen hinzu, die das schwankende Fahrprofil positiv beeinflussen. Fahrzeuge im Langstreckenbetrieb hingegen, sind meist durch lange Zeitintervalle mit einer konstanten Fahrgeschwindigkeit charakterisiert, in denen lediglich die Streckentopologie zu einem dynamischen Fahrprofil führen.⁹⁰ Demnach kann für das leichte Nutzfahrzeug N1 ein städtisches Fahrprofil angenommen werden, welches durch ein häufiges Halten und Anfahren charakterisiert ist, wobei der schwere LKW N3 für Auslieferungen im Fernverkehr keiner nennenswerten Fluktuation, außer den geographischen Gegebenheiten, unterlegen ist. Das Fahrprofil des mittelschweren LKWs N2 setzt sich dabei aus den beiden genannten Einsatzprofilen zusammen, die verschiedene Teilstrecken miteinander kombiniert.

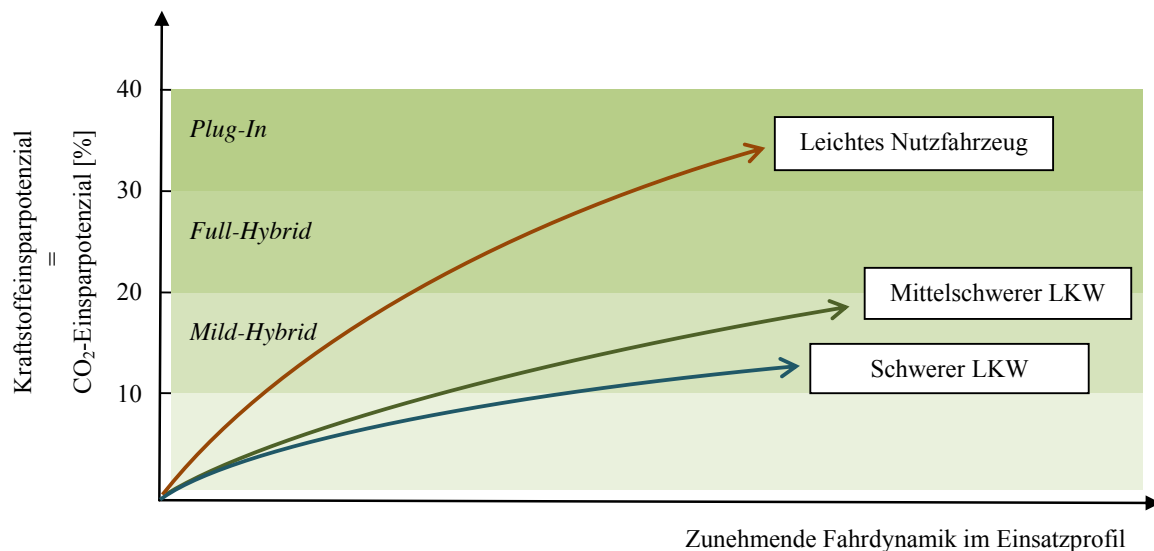
4.1.2 Realisierbare Einsparungen

Ausgehend von den vorangegangenen Erkenntnissen und den möglichen Kraftstoffeinsparungen durch hybridisierte Antriebsstrukturen aus Kapitel 3, ergeben sich unter Berücksichtigung der jeweiligen Fahrprofile, die folgenden möglichen Kraftstoffeinsparpotenziale der betrachteten Lieferfahrzeuge im logistischen Anwendungsfeld, die in der nachfolgenden Abbildung 7 gegeben sind:

⁸⁸ Vgl. Beidl et al. (2011), S. 434

⁸⁹ Vgl. ebenda, S. 435

⁹⁰ Vgl. Voß (2005), S. 93

Abbildung 7: Realisierbare Kraftstoff- bzw. CO₂-Einsparpotenziale von Hybriden

Aus der Abbildung 7 geht hervor, dass besonders leichte Nutzfahrzeuge mit einer starken Hybridisierung ein hohes Maß an Kraftstoff und somit auch an CO₂-Emissionen einsparen können. Das Potenzial kann dabei durch eine Plug-In-Variante weiter bis auf über 30 % gesteigert werden, wobei die Einsparungen beim schweren und mittelschweren LKW, aufgrund der Hybridisierung bis zur Mild-Stufe, deutlich niedriger ausfallen. Deutlich wird zudem wieder auch, dass die Höhe der Vorteile stark von dem gegebenen Einsatzprofil abhängt. Durch eine zunehmende Dynamik im Fahrprofil der Lieferfahrzeuge, können bei gleichbleibender Hybridisierung, höhere Einsparungen erzielt werden. Bei den Lieferfahrzeugen im urbanen Einsatzgebiet, wie das das leichte Nutzfahrzeug und teilweise der mittelschwere LKW auch, führen somit höhere Brems- und Anfahrfrequenzen im innerstädtischen Bereich insgesamt zu einem effizienteren Energieeinsatz. Für den schweren LKW im Fernverkehr hingegen, spielen aufgrund seiner konstanten Fahrgeschwindigkeit auf langen Strecken und den seltenen Stopps im Fahrbetrieb, die stark welligen und im Höhenprofil wechselnden Straßen die entscheidende Rolle, um dynamische Fahrimpulse über das Einsatzprofil zu realisieren. Hier werden vor allem Bremsenergie bei Geschwindigkeitsanpassungen und bei Berg- und Talfahren zurückgewonnen, weshalb sich das Einsparpotenzial bei größeren Nutzfahrzeugen im Fernverkehr in geographisch in der Höhe variierenden Einsatzgebieten vergrößern kann. Insgesamt liegen die Kraftstoffreduktionen und die daraus resultierenden CO₂-Einsparungen beim schweren und mittelschweren LKW bedingt durch die Hybridisierung bis zur Mild-Stufe dennoch unter 20 %, wobei der mittelschwere LKW durch sein kombiniertes und dynamischeres Fahrprofil diesen Wert wesentlich schneller erreicht.

4.1.3 Praxisbeispiele

Im Gegensatz zum PKW nimmt die hybridisierte Antriebsstruktur im logistischen Anwendungsfeld in Form von Nutzfahrzeugen nur spärlich Einzug. Trotzdem ist das Interesse an der Technologie steigend zu bewerten, weshalb sich allmählich die ersten erfolgreichen Anwendungen auf dem Markt

durchsetzten.⁹¹ Beispielsweise setzt seit Ende letzten Jahres der europaweit agierende Handelskonzern Spar erstmals hybride Lieferfahrzeuge in seinem Fuhrpark ein. Das Nutzfahrzeug mit dem Namen „FE Hybrid“ wird dabei überwiegend im Wiener Stadtverkehr eingesetzt und leistet dort einen wirkungsvollen Beitrag zum Klimaschutz. Laut dem Hersteller verbraucht der Volvo FE im Gegensatz zur konventionell ausgelegten Variante rund 20 % weniger Kraftstoff und stößt dementsprechend genauso wenig an CO₂-Emissionen aus.⁹² Auch die Spedition Heinrich Gustke GmbH mit Sitz in Rostock testet als erstes Logistikunternehmen Hybridfahrzeuge im täglichen Einsatz. Bei den Fahrzeugen handelt es sich dabei um Mercedes-Benz „Atego BlueTec“-Hybride, die sich sowohl für innerstädtische Anwendungen in Ballungsgebieten, als auch für Überlandeinsätze eignen und erfolgreich Emissions- und Kraftstoffreduktionen von 10 bis 15 % realisieren.⁹³ Selbst für den Fernverkehr entstehen die ersten Konzepte zur Hybridisierung. So verbrauchte der von Daimler-Trucks entwickelte „Super Great HEV“ bei Testfahrten auf japanischen Autobahnen bis zu 10 % weniger an Dieselmotorkraftstoff, weil das Hybridsystem schon bei sehr geringem Gefälle größere Energiemengen zurückgewinne.⁹⁴ Insgesamt sind die Einsparpotenziale durch hybridisierte Antriebsstrukturen somit auch in der Praxis durchaus positiv zu bewerten.

4.2 Einsparpotenziale rein elektrischer Antriebe

Aufgrund seiner beschränkten Reichweite bietet sich der rein elektrische Antrieb, im Gegensatz zu den hybridisierten Antriebsstrukturen, derzeit nur für den Einsatz im Nahverkehr ein, weshalb die Betrachtung bei diesem Antriebskonzept lediglich auf das leichte Nutzfahrzeug fällt. Dabei wurde im Kapitel 3 deutlich, wenn es um die Bewertung der Emissionswirkung und das Einsparpotenzial rein elektrischer Antriebe geht, man der energetischen Vorkette besonderes viel Aufmerksamkeit widmen sollte, da rein elektrische Fahrzeuge zwar lokal emissionsfrei fahren, aber ihr Schadstoffausstoß letztendlich von dem verwendeten Strommix abhängt. Für eine transparente Bewertung rein elektrischer Antriebe hinsichtlich der Klimawirkung, ist somit eine Betrachtung der energetischen Vorkette unerlässlich und bildet gleichzeitig die Bewertungsbasis der Umweltfreundlichkeit dieser Antriebskonzepte. Deshalb wird im Folgenden zunächst auf den Strommix eingegangen, um anschließend anhand dieser die tatsächlich verhinderbaren Emissionswirkungen im Hinblick auf das klimaschädliche CO₂-Gas am leichten Nutzfahrzeug aufzuzeigen. Daran anknüpfend werden wieder einige Praxisbeispiele gegeben, die erfolgreiche Anwendungen auf dem derzeitigen Markt zeigen.

4.2.1 Bedeutung und Darlegung des Strommixes

Als indirekte Einflussgröße auf die Emissionswirkung rein elektrischer Antriebe ist, wie oben schon beschrieben, dem Strommix eine besondere Aufmerksamkeit zu schenken. Fakt ist, dass das Elektrofahrzeug sich vor Ort emissionsfrei bewegt und dadurch lokal der Umwelt keine Schadstoffe zufügt. Ob diese Umweltfreundlichkeit auch über die gesamte Treibhausgasbilanz gehalten werden kann, zeigt lediglich eine nähere Betrachtung des bereitgestellten Stromes im Energiespeicher des Elektrofahrzeuges. Dabei läuft die Entladung der Batterie in allen Fällen zwar emissionslos ab,

⁹¹ Vgl. Esch (2010), S. 658

⁹² Vgl. Onlinequelle: AMZ (2011)

⁹³ Vgl. Onlinequelle: Gustke Logistik (2010)

⁹⁴ Vgl. VDI (2011), S. 17

dennoch sollte beachtet werden, dass eine indirekte Schadstoffausschüttung erfolgen kann, wenn der Energieinhalt der Batterie aus fossilen Brennstoffen entstammt und sich bereits in den Vorstufen der Prozesskette CO₂-Emissionen angereichert haben. Wie hoch dieser sein kann, zeigt eine nähere Betrachtung der prozentuellen Aufteilung der Energieträger, aus denen der Strom erzeugt wird. Tabelle 6 listet hierzu den derzeitigen bundesweiten durchschnittlichen Strommix auf:

<i>Energieträger</i>	<i>Durchschnitt</i>
Fossile Energieträger	57,8 %
Kernenergie	24,9 %
Erneuerbare Energieträger	17,3 %
CO₂-Emissionen [g/kWh]	494

Tabelle 6: Derzeitiger durchschnittlicher Strommix Deutschlands⁹⁵

Demnach setzt jede verbrauchte Kilowattstunde durchschnittlich 494 Gramm Kohlendioxid frei.⁹⁶ Auffallend ist dabei der große Anteil der Kernenergie und der fossilen Energieträger, die zusammen mit 82,7 % das Rückgrat der deutschen Stromversorgung bilden. Zu den fossilen Energieträgern zählen dabei die Braunkohle (23 %), Steinkohle (19 %), Erdgas (13 %) und sonstige (6 %, z. B. Erdöl). Strom aus erneuerbaren Energien hingegen machen insgesamt 17,3 % des gesamten Bruttostromverbrauchs aus, die sich aus Wind- (6 %), Wasser- (3,3 %) und Solarenergie (2 %) sowie der Biomasse (5,5 %) zusammensetzen.⁹⁷

4.2.2 Realisierbare Einsparungen

Ausgehend von den vorangegangenen Erkenntnissen, hängt somit die Treibhausgasbilanz eines rein elektrischen Fahrzeuges von den Emissionen ab, die durch die Bereitstellung des Stromes entstehen. Da der rein elektrische Antrieb, dem aufgespannten Kontext entsprechend, sich derzeit nur für den Nahverkehr eignet, soll eine Beispielrechnung anhand eines leichten Nutzfahrzeuges das Verständnis für diesen Zusammenhang verdeutlichen und die tatsächlich realisierbare Einsparung gegenüber konventionellen Antrieben aufzeigen: Ein rein elektrisch betriebener Kleintransporter im logistischen Einsatz in Form eines leichten Nutzfahrzeuges hat bei heutiger Technologie einen Stromverbrauch von etwa 0,3 kWh/km.⁹⁸ Wird dieses mit dem derzeitigen Kohlendioxidausstoß des oben zugrunde gelegten Strommixes verrechnet, ergibt sich eine CO₂-Emission von etwa 148,2 gCO₂/km. Konventionell angetriebene Nutzfahrzeuge in derselben Fahrzeugkategorie hingegen, weisen einen durchschnittlichen CO₂-Ausstoß von etwa 200 g pro gefahrenen Kilometer auf.⁹⁹ Im direkten Vergleich ergibt sich somit eine Kohlendioxid-Ersparnis von ungefähr 35 %. Dieser Reduktion liegt dabei ein Anteil von 17,3 % an erneuerbaren Energien zugrunde, welches den derzeitigen durchschnittlichen bundesweiten Strommix wiedergibt. Bei ausschließlicher Verwendung erneuerbarer Energien hingegen stellt das batteriebetriebene Fahrzeug ein absolut umweltfreundliches Antriebskonzept mit einer 100-prozentigen CO₂-Einsparung dar. Abbildung 8 fasst die Ergebnisse zusammen:

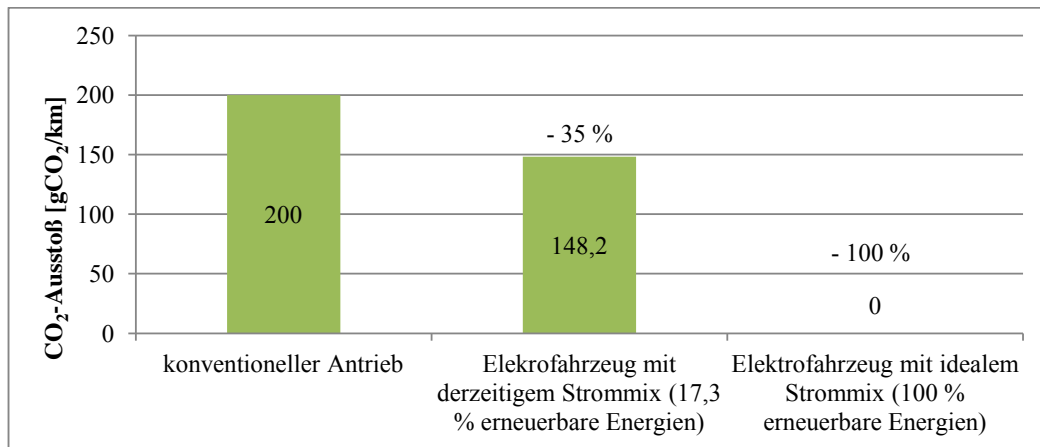
⁹⁵ In Anlehnung an Onlinequelle: BDEW (2010)

⁹⁶ Vgl. ebenda

⁹⁷ Vgl. Onlinequelle: AFEE (2012)

⁹⁸ Vgl. Onlinequelle: Shell (2010)

⁹⁹ Vgl. Onlinequelle: ATZ Online (2010)

Abbildung 8: Realisierbare CO₂-Einsparpotenziale rein elektrischer Antriebe im LNfz

4.2.3 Praxisbeispiele

Auch im Bereich rein elektrischer Antriebe existieren bereits die ersten erfolgreichen Praxisumsetzungen im logistischen Anwendungsfeld. So fertigt Mercedes-Benz mit dem Vito E-Cell seit Herbst 2010 den weltweit ersten rein elektrisch betriebenen Transporter in Serie. Dabei handelt es sich um ein leichtes Nutzfahrzeug, das von ausgewählten logistischen Branchen in einem Großprojekt über 4 Jahre eingesetzt und auf Alltagstauglichkeit erprobt wird. Als einer der Hauptabnehmer zählt dabei die Hermes Logistik Gruppe, die aktuell 20 Fahrzeuge „auf der letzten Meile“ bei ihren Paketzustellungen in den Städten Berlin und Hamburg testet und bisher eine positive Zwischenbilanz ziehen konnte.¹⁰⁰ Durch eine intelligente Ladetechnik nutzt der E-Cell vor allem Ökostrom und weist somit eine hervorragende Umweltverträglichkeit vor, indem die Emissionen gänzlich gegen Null konvergieren.¹⁰¹ Auch die Deutsche Post DHL mit ihrem Klimaschutzprogramm „GoGreen“ verpflichtet sich zu Nachhaltigkeit, indem sie in ihrer Fahrzeugflotte derzeit mehrere rein elektrische Antriebskonzepte einsetzt und dadurch die Umwelt, im Vergleich zu konventionell angetriebenen Fahrzeugen, deutlich entlasten konnte.¹⁰²

4.3 Bewertung der Antriebskonzepte

Nachdem die CO₂-Einsparpotenziale der elektromobilen Antriebskonzepte im logistischen Anwendungsfeld bezogen auf den Straßengüterverkehr aufgedeckt worden sind, sollen nun in Tabelle 7 die Ergebnisse zusammengefasst dargestellt und abschließend bewertet werden. Während (o) für ein sehr geringes und (-) für kein mögliches Einsparpotenzial steht, weist das (+) auf ein vorhandenes Reduktionspotenzial bezüglich des Kraftstoffverbrauchs und der damit zusammenhängenden CO₂-Emissionen hin, der aufsteigend umso positiver zu bewerten ist. Der große Stern (★) stellt dabei den Idealfall dar, indem die gesamten Emissionen zu 100 % vermieden werden.

¹⁰⁰ Vgl. Gregori & Wimmer (2011), S. 194 ff.

¹⁰¹ Vgl. Onlinequelle: AutoMotor (2012)

¹⁰² Vgl. Gregori & Wimmer (2011), S. 188 ff.

Fahrzeugklasse und logistisches Anwendungsgebiet	Elektromobile Antriebskonzepte				
	Hybride Antriebsstrukturen			Reines Elektrofahrzeug	
	Micro-Hybrid	Mild-Hybrid	Full-Hybrid	Derzeitiger Strommix ¹⁰³	Idealer Strommix ¹⁰⁴
Leichtes Nutzfahrzeug N1 (Nahverkehr)	++	+++	++++	++++	★
Mittelschwerer LKW N2 (Regionalverkehr)	+	++	-	-	-
Schwerer LKW N3 (Fernverkehr)	0	+	-	-	-
CO₂-Einsparung	bis zu 10 %	bis zu 20 %	bis zu 30 %	35 %	100 %

Tabelle 7: Bewertungsmatrix der CO₂-Einsparungen durch elektromobile Antriebskonzepte

Anhand des leichten Nutzfahrzeuges im Nahverkehr soll beispielhaft dargestellt werden, wie es zu den jeweiligen Bewertungen gekommen ist.

Zunächst kann das leichte Nutzfahrzeug von allen elektromobilen Antriebskonzepten profitieren, da solche Fahrzeugklassen in urbanen Einsatzgebieten sich besonders gut für eine Elektrifizierung des Antriebsstranges eignen. Dabei wird es in der niedrigsten Hybridisierungsstufe (Micro-Hybrid) mit einem doppelten Plus (++) bewertet, da es im Gegensatz zum mittelschweren LKW im Regionalverkehr und dem Schwer-LKW im Fernverkehr, über sein dynamischeres Fahrprofil in der Stadt, ein höheres Einsparpotenzial realisieren kann. Desweiteren kann auch über die nächsthöhere Elektrifizierungsstufe des Antriebsstranges eine stärkere Reduktion des Kraftstoffverbrauchs und der damit zusammenhängenden CO₂-Abgase erreicht werden, weshalb die Bewertung zum reinen Elektrofahrzeug hin positiv zunimmt, bis die Emissionen durch Verwendung von Ökostrom, gänzlich gegen Null konvergieren, der letztendlich den Idealfall darstellt.

Aus der Tabelle 7 geht zudem hervor, dass eine vollständig nachhaltige Logistik nur durch den Einsatz rein elektrischer Antriebe in Kombination mit dem idealen Strommix erreicht werden kann, wobei sich diese derzeit lediglich auf den Nahverkehr beschränken. Alle anderen Kombinationsmöglichkeiten bewirken lediglich Effizienzsteigerungen bis zu maximal 35 %, die die Nachfrage nach Öl senken, aber höchstwahrscheinlich langfristig keinen weiteren Nutzen bringen werden. In der Schlussbetrachtung im Kapitel 6 wird hierauf noch einmal ausführlicher eingegangen.

¹⁰³ Anteil an erneuerbaren Energien: 17,3 %¹⁰⁴ Anteil an erneuerbaren Energien: 100 % (Ökostrom)

5 Das Kostenmodell der Antriebssysteme

Das vorangegangene Kapitel hat gezeigt, dass eine vollständig nachhaltige Logistik nur durch den Einsatz von rein elektrisch betriebenen Fahrzeugen erreicht werden kann. Da derzeit die Anschaffungskosten dieser Fahrzeuge den der konventionell angetriebenen um Weiten übersteigen, ergibt sich für den Logistikdienstleister im Rahmen der Plankostenrechnung und in Bezug auf die ökologische Dimension der Nachhaltigkeit, die entscheidende Frage, ab wann es sich lohnt, ein solches Nutzfahrzeug unter Berücksichtigung der Einsatzrestriktionen in den Flottenfuhrpark aufzunehmen. Die entsprechende Motivation leitet sich dabei aus der Wissenschaft der Ökonomie ab, die die Versorgung der Menschen mit den erforderlichen Gütern und Leistungen zu minimalen Kosten fordert. Aus diesem Ziel resultiert auch gleichzeitig die Aufgabe der Logistik, *„die benötigten Logistikleistungen mit minimalen Kosten zu organisieren und zu erbringen sowie mit optimalem Gewinn zu kalkulieren, zu vermarkten und abzurechnen.“*¹⁰⁵ Um nun eine Aussage über die künftige Wirtschaftlichkeit der Antriebssysteme zu machen, ist es notwendig, kostenentscheidende Parameter in einem Modell zu definieren und in einer vergleichenden Analyse die Entwicklung dieser Zielgrößen über die nächsten Jahre zu betrachten. In den folgenden Abschnitten dieses Kapitels werden deshalb die jeweiligen Entwicklungen der kostenentscheidenden Parameter von konventionellen und rein elektrischen Antriebssystemen erarbeitet, um anschließend anhand dieser eine Beurteilung der Wirtschaftlichkeit auf Basis der zukünftig anfallenden Gesamtkosten durchführen zu können. Als Berechnungsgrundlage für diesen wird der dieselbetriebene Kleintransporter „Vito 110 CDI“ von Mercedes-Benz als Referenzfahrzeug herangezogen, der baugleich auch mit einem Elektroantrieb als „Vito E-Cell“ erhältlich ist. Technische Daten beider Antriebsvarianten sind dabei im Anhang auf Seite XLI nachzulesen. Weiterhin gelten folgende Basisannahmen:

- Einsatz der Fahrzeuge im städtischen Güterverkehr (Citylogistik)
- Laufleistung 25.000 km p.a.
- Konstante Fahrzeugpreise für beide Antriebskonzepte 30.000 €
- Gleichbleibende Besteuerung der Energieträger
- Keine Subventionen

Der Verbrauch des konventionellen Fahrzeugs wird mit 15 Litern Dieselmotorkraftstoff auf 100 Kilometern angenommen, jedoch mit deutlichem Potenzial zur Verbrauchsreduktion in den Folgejahren. Die rein elektrisch betriebene Variante benötigt für dieselbe Laufleistung 30 kWh Strom, wobei hier mit keinen weiteren Effizienzsteigerungen im Stromverbrauch zu rechnen ist.¹⁰⁶

5.1 Kostenentscheidende Parameter des konventionellen Fahrzeugs

Die Wirtschaftlichkeit des konventionellen Fahrzeugs hängt von mehreren Faktoren ab. Dabei werden Kosten für die Wartung, die innerhalb fester Intervalle oder nutzungsabhängig anfallen, aufgrund der Schwierigkeit bei der Quantifizierung nicht mit in die Berechnung einbezogen. Weiterhin können die Kosten für die Kraftfahrzeugsteuer ausgeklammert werden, da sie einen relativ geringen Anteil an den Betriebskosten haben und länderspezifisch verschieden gehandhabt werden. Wichtige Einflussgrößen

¹⁰⁵ Gudehus (2006), S. 187

¹⁰⁶ Realistische Werte nach IFAM (2012)

für die Wirtschaftlichkeit des konventionellen Antriebs stellen somit die zukünftige Entwicklung der Dieselpreise und die motorentechnische Effizienzsteigerung unseres Referenzfahrzeuges dar, die im Folgenden näher betrachtet werden.

5.1.1 Die künftige Entwicklung der Dieselpreise

Der Preis für Dieselkraftstoff stellt den größten Kostentreiber für die Betriebskosten unseres Referenzfahrzeuges mit Verbrennungsmotor dar und hat einen erheblichen Einfluss auf dessen Wirtschaftlichkeit. Da die Preise sowohl für Benzin- und Dieselkraftstoff vom Rohölpreis abhängen, lässt sich auch ihre zukünftige Entwicklung unmittelbar von ihr ableiten. Wie bereits im Abschnitt 2.2.1 schon ausführlich diskutiert, ist nach dem Erreichen der maximalen Fördermenge des Öls mit sprunghaften Preisanstiegen im Bereich der fossilen Energieträger zu rechnen. Für die Wirtschaftlichkeit des konventionellen Antriebs bedeutet dies eine Verschiebung der Vorteilhaftigkeit zugunsten des Elektrofahrzeugs, da die Verteuerung der fossilen Kraftstoffpreise die laufenden Kosten des Verbrennungsmotors stetig erhöhen werden. Die Abbildung 9 zeigt dabei die Entwicklung der Dieselpreise über die letzten Jahrzehnte in Euro pro Liter. Da eine exponentielle Funktion die bisherigen Preise für den Dieselkraftstoff am besten wiedergibt und es in Zukunft mit immer höher werdenden Preisanstiegen zu rechnen ist, wird dieser Verlauf der Regressionskurve auch für die Ermittlung der künftigen Dieselpreise herangezogen und für die anschließende Betriebskostenberechnung des konventionellen Fahrzeugs verwendet.

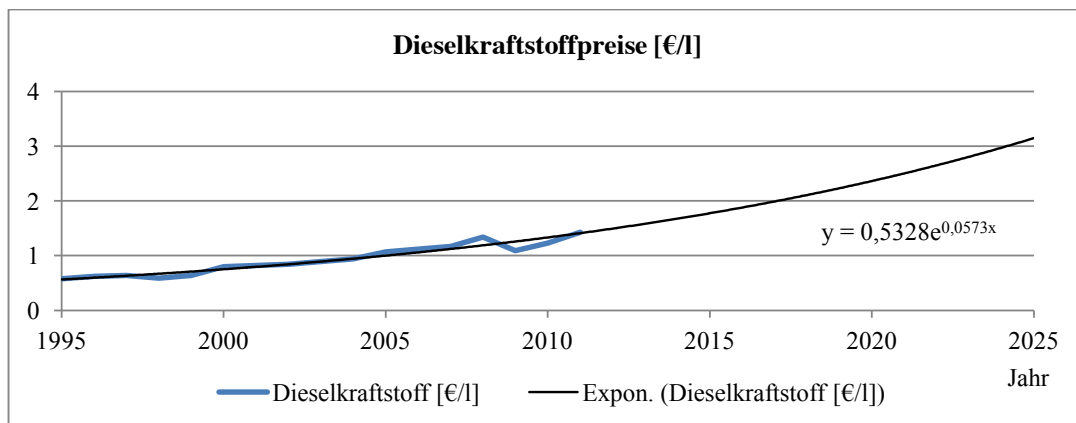


Abbildung 9: Entwicklung der Dieselkraftstoffpreise¹⁰⁷

5.1.2 Die künftige Entwicklung des Kraftstoffverbrauchs

Um den steigenden Energiekosten entgegenzuwirken, rücken optimierte Verbrennungsmotoren, die auf eine zunehmende Verbrauchsreduktion abzielen, immer mehr in den Blickpunkt. Während die Kraftstoffpreise die Wirtschaftlichkeit des konventionellen Antriebs verschlechtern, wirken sich motorentechnische Verbrauchsreduzierungen positiv auf die Betriebskosten-Bilanz des herkömmlichen Fahrzeugs aus. Da aber keine genaue Prognose über die technischen Lösungen und der damit verbundenen Verbrauchreduzierungen in der Zukunft gemacht werden kann, soll die Entwicklung des

¹⁰⁷ Daten aus Onlinequelle: BMWi (2012)

Kraftstoffverbrauchs, auf Basis zukünftiger CO₂-Grenzwerte für leichte Nutzfahrzeuge, abgeschätzt werden.

Der derzeitige CO₂-Durchschnittsausstoß leichter Nutzfahrzeuge liegt ungefähr bei 200 Gramm pro gefahrenen Kilometer.¹⁰⁸ Analog zu den Regelungen für den PKW, hat die Europäische Union Ende 2010 auch für leichte Nutzfahrzeuge mit einem Gesamtgewicht von bis zu 3,5 Tonnen eine entsprechende Verordnung erlassen, die die gesetzliche Regulierung des zukünftigen CO₂-Ausstoßes vorschreibt. Demnach sollen neue Transporter zunächst einen durchschnittlichen CO₂-Ausstoß von 175 Gramm bis zum Jahr 2017 erreichen, dessen Wert schließlich im Jahr 2020 bis auf 147 Gramm pro gefahrenen Kilometer sinkt.¹⁰⁹ Bei Nichteinhaltung der vorgeschriebenen Grenzwerte drohen Strafzahlungen, die pro überschrittenes Gramm Kohlendioxid fällig werden.¹¹⁰ Bezogen auf unser konventionell angetriebenes Fahrzeug bedeutet dies, eine Verbrauchreduzierung von 26,5 % bis zum Jahr 2020, um den politischen Gegebenheiten zu genügen und Strafzahlungen zu vermeiden. Bei einer derzeitigen Verbrauchsannahme von 15 Litern Dieselmotorkraftstoff im intensiven Stadtverkehr, ergibt sich somit für das Jahr 2020 ein Durchschnittsverbrauch von umgerechnet 11,025 Litern. Mit der Annahme einer exponentiellen Abnahme ergibt sich in Abbildung 10 die folgende mögliche Entwicklung des Kraftstoffverbrauchs, die ebenfalls für die anschließende Betriebskostenberechnung des konventionellen Fahrzeugs herangezogen wird.

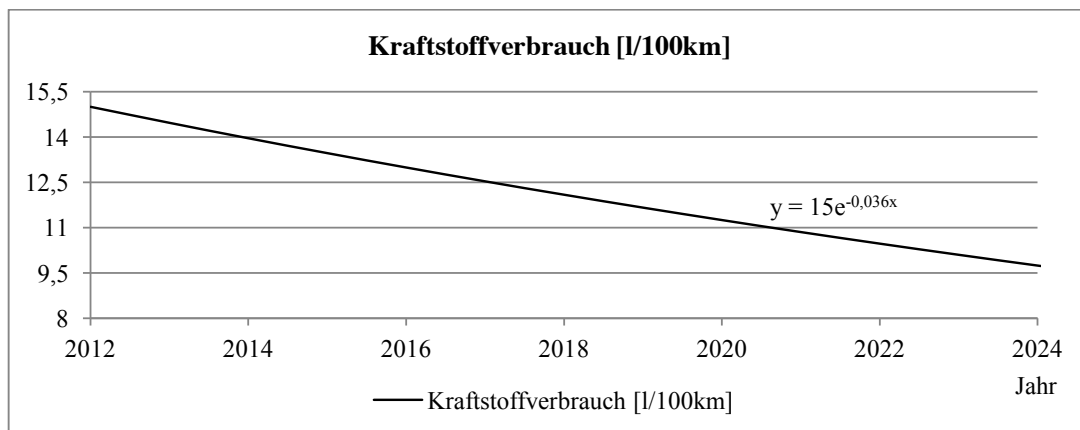


Abbildung 10: Entwicklung des Kraftstoffverbrauchs

5.2 Kostenentscheidende Parameter des rein elektrischen Fahrzeugs

Die Wirtschaftlichkeit des rein elektrischen Fahrzeugs hängt, genauso wie die konventionelle Variante mit Verbrennungsmotor auch, von mehreren Faktoren ab. Die Kosten für die Wartung und der Kraftfahrzeugsteuer können hier auch vernachlässigt werden, da sie einen geringen Anteil an den Betriebskosten haben und im Bereich der staatlichen Abgaben ohnehin von einer fünfjährigen Steuerbefreiung profitieren. Relevante Kostentreiber der elektrischen Variante unseres Referenzfahrzeuges stellen somit die Entwicklung der zukünftigen Batterie- und Strompreise dar, auf die im Folgenden näher eingegangen wird.

¹⁰⁸ Vgl. Onlinequelle: ATZ Online (2010)

¹⁰⁹ Vgl. Onlinequelle: VCD (2012)

¹¹⁰ Vgl. Onlinequelle: ATZ Online (2010)

5.2.1 Die künftige Entwicklung der Batteriepreise

Wie bereits in Kapitel 2.3 erläutert, ist die Batterie im elektromobilen Antriebsstrang die Kernkomponente und entscheidet neben den technischen Leistungen auch maßgebend über die Wirtschaftlichkeit eines Elektrofahrzeugs. Da den Lithium-Ionen-Batterien derzeit das höchste Entwicklungspotenzial zugesprochen wird (vgl. hierzu Abschnitt 3.3.2) und es auch in der elektrisch ausgelegten Variante unseres Referenzfahrzeuges verbaut ist, beschränkt sich die Betrachtung auch nur auf diese Technologie.

Die Kosten für einsatzfähige Batteriemodule in Elektrofahrzeugen werden in der Regel bezogen auf den Energieinhalt in Euro pro Kilowattstunde (€/kWh) angegeben. Für Lithium-Ionen-Batterien liegen die Preise heute zwischen 700 – 1000 € pro Kilowattstunde, wobei die Preisspanne durch Qualitätsunterschiede der Energiespeicher zu erklären sind.¹¹¹ Grund der hohen Preise sind geringe Stückzahlen bei den Herstellern bzw. wenige Serienproduktionen in Bezug auf den elektromobilen Einsatz der Akkumulatoren. Dennoch sind durch Massenfertigung erhebliche Skaleneffekte zu erwarten, welches beispielsweise die Kostenentwicklung der Lithium-Ionen-Batterien aus dem Heimanwenderbereich zeigt. Die Kosten wurden hier innerhalb eines Zeitraumes von zehn Jahren um den Faktor fünf, auf derzeit knapp über 200 €, reduziert.¹¹² Durch höhere Produktionsvolumina und einer Weiterentwicklung auf der elektrochemischen Ebene, sind dabei ähnliche Kostenverläufe auch im Bereich der Fahrzeugbatterien zu erwarten.

Drei verschiedene Studien über die Batteriekosten im Jahr 2020 zeigen die mögliche Preisentwicklung: Die Boston Consulting Group geht hier von einem durchschnittlichen Batteriepreis von 320 Euro, die McKinsey Company von einem Durchschnittspreis von 302 Euro aus, wobei die Deutsche Bank die stärkste Preisreduktion mit 200 Euro pro Kilowattstunde für das Jahr 2020 erwartet.¹¹³ Um allen Studien Rechnung zu tragen, wird ein Durchschnittswert von 274 Euro pro Kilowattstunde ermittelt, welches letztendlich den Preis im Jahr 2020 für eine Kilowattstunde darstellt. Unter der Annahme einer exponentiellen Abnahme, ergibt sich somit die folgende Funktion für die künftige Entwicklung der Batteriepreise, die in Abbildung 11 dargestellt ist und für die anschließende Kostenberechnung des elektrischen Fahrzeugs verwendet wird.

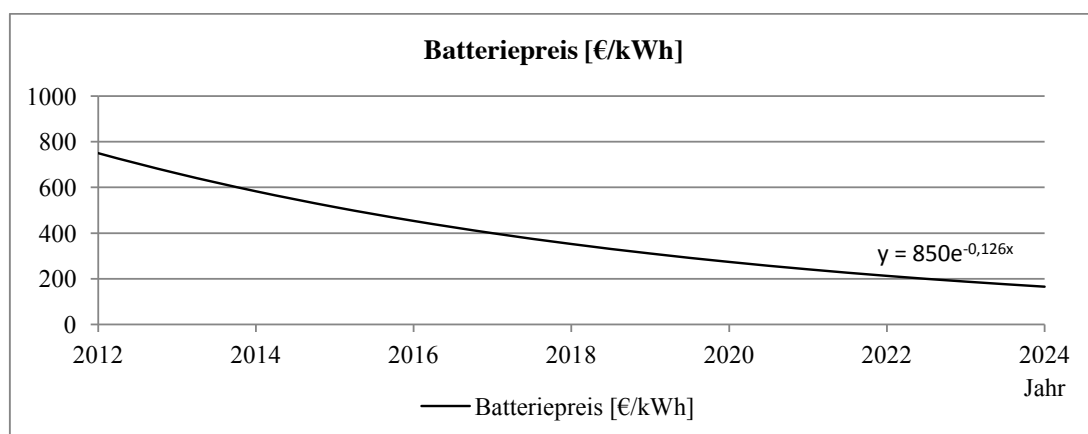


Abbildung 11: Entwicklung der Batteriepreise

¹¹¹ Vgl. Wietschel et al. (2010), S. 85

¹¹² Vgl. Wallentowitz et al. (2010), S. 129

¹¹³ Vgl. BCG (2009), S. 7, McKinsey (2009), S. 89 & DB (2010), S.20; Umrechnung: 1 € = 0,8 \$

5.2.2 Die künftige Entwicklung der Strompreise

Während die Batteriepreise ausschließlich die Anschaffungskosten eines Elektrofahrzeugs beeinflussen, haben die Strompreise direkten Einfluss auf die Betriebskosten und dessen fortlaufende Wirtschaftlichkeit. Da die Betrachtung aus Sicht eines Logistikdienstleisters erfolgt, werden ausschließlich die Industriestrompreise herangezogen und die künftige Entwicklung auf Basis der Vergangenheitswerte abgeschätzt. Blickt man auf die bisherige Entwicklung der Strompreise zurück, fällt zunächst ein Abwärtstrend auf, der ungefähr zur Jahrtausendwende ihren Tiefpunkt erreichte und zusätzlich durch den Rationalisierungsschub verstärkt wurde. Dieser äußerte sich dabei in Form von Unternehmensfusionen und –übernahmen auf dem Strommarkt, die weitere Synergien freisetzen und somit den Strompreis weiter nach unten drückten. Erst durch die anschließende Konsolidierung auf den Strommärkten, steigen die Strompreise wieder kontinuierlich an, die auf deutliche Verteuerungen der Energierohstoffe Kohle und Erdgas zurückzuführen sind.¹¹⁴ Zusätzlich sorgen gegenwärtig immer strenger werdende Umweltschutzanforderungen für Investitionstätigkeiten auf der Stromerzeugerseite, die letztendlich auch über den Strompreis an den Verbraucher weitergegeben werden und den derzeitigen Aufwärtstrend verstärken.¹¹⁵ Im Gegensatz zu den Kraftstoffpreisen erscheinen aggressive Preisanstiege beim Industriestrompreis dennoch unwahrscheinlich, womit für den weiteren Verlauf eine lineare Entwicklung angenommen wird, zumal eine lineare Regression die bisherigen Daten ohnehin mit der niedrigsten Varianz, am besten wiedergibt.

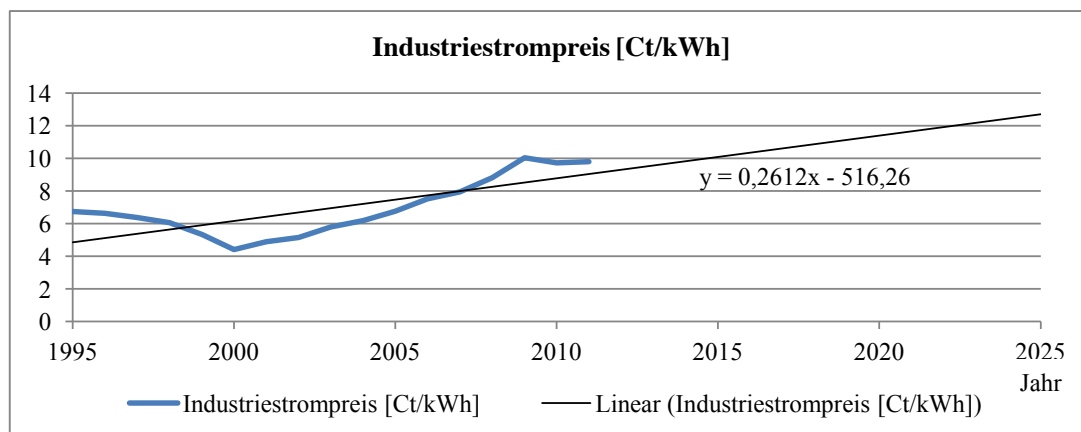


Abbildung 12: Entwicklung der Industriestrompreise¹¹⁶

5.3 Gegenüberstellung der Antriebssysteme

Nachdem die kostenentscheidenden Parameter für das Modell definiert worden sind, können nun die anfallenden Gesamtkosten der beiden Antriebskonzepte berechnet und gegenübergestellt werden. Unter Berücksichtigung der Basisannahmen und der zugrunde gelegten Entwicklung der Einflussgrößen auf die Wirtschaftlichkeit der jeweiligen Antriebskonzepte, ergeben sich dabei folgende Gesamtkostenverläufe für das Referenzfahrzeug und seiner elektrisch ausgelegten Variante, die in der folgenden Abbildung 13 dargestellt sind. Die periodengerechte und genaue zahlenmäßige

¹¹⁴ Vgl. Onlinequelle: GTAI (2011)

¹¹⁵ Vgl. Wallentowitz et al. (2010), S. 132

¹¹⁶ Daten aus Onlinequelle: BMWi (2012)

Unterlegung der beiden Graphen kann dabei aus den Seiten XLII und XLIII im Anhang entnommen werden.

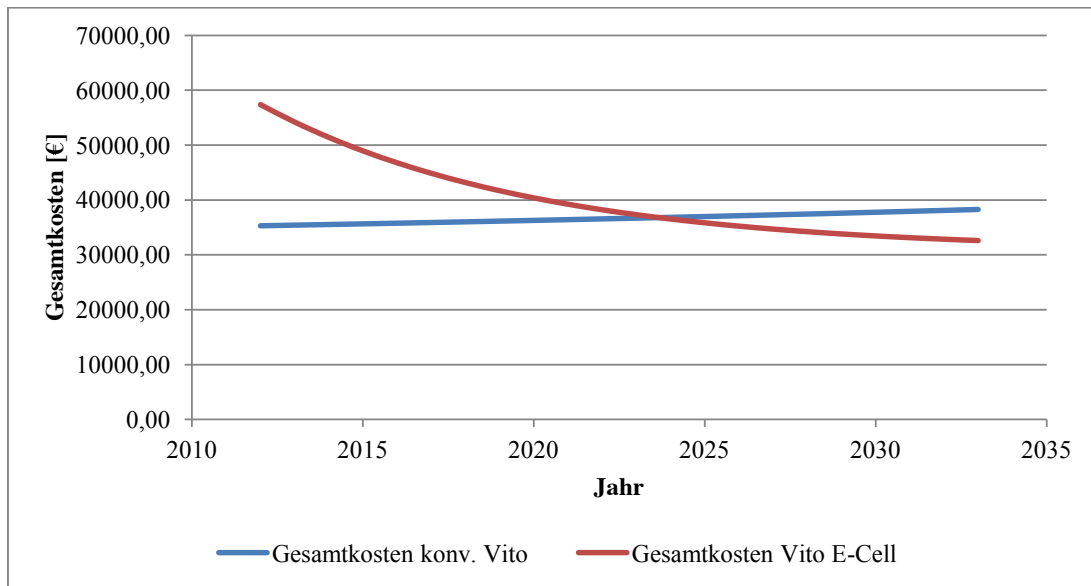


Abbildung 13: Entwicklung der Gesamtkosten der Antriebssysteme

Aus der Abbildung 13 geht hervor, dass die Gesamtkosten der elektrischen Variante des Referenzfahrzeuges einen fallenden Verlauf annehmen, während der konventionelle Antrieb stetig steigender Kosten gegenübersteht. Das Elektrofahrzeug im Kostenmodell überschreitet dabei erstmalig im Jahr 2024 die gewinnmaximierende Schwelle, indem die hohen Anschaffungspreise des Elektrofahrzeugs durch niedrige Betriebskosten kompensiert werden und den Einsatz dieses Antriebskonzeptes ab diesem Zeitpunkt gegenüber der konventionellen Variante insgesamt rentabler macht. Eine nähere Beschreibung der jeweiligen Kostenentwicklungen erfolgt dabei im folgenden Kapitel 6 im Rahmen der Schlussfolgerungen ausführlicher.

6 Schlussfolgerungen










Der weltweite Anstieg des Gütertransports stellt für die Logistik eine besondere Herausforderung dar. Während die Nachfrage nach Transportleistungen mit hohen Wachstumsraten immer weiter ansteigt, sollen sich auf der anderen Seite die daraus resultierenden Emissionen nach Möglichkeit nicht weiter erhöhen, idealerweise sogar abgesenkt werden. Da aber die Logistik mit ihrem Aufbau und ihrer Konfiguration, Organisation, Steuerung sowie der Regelung von Objektflüssen in ihrer Gesamtheit fast vollständig vom Erdöl abhängig ist und gleichzeitig zu den größten Schadstoffemittenten zählt, ist sie bei den Themen Nachhaltigkeit und Klimaschutz besonders gefordert, die durch eine Steigerung der Energieeffizienz gelöst werden muss. Die zentrale Herausforderung liegt dabei darin, dem Wachstum des logistischen Transportaufkommens mit einem effizienteren Energieeinsatz entgegenzuwirken und die zunehmende Substitution fossiler Brennstoffe sicherzustellen. Hierzu bieten die elektromobilen Antriebskonzepte einen sehr guten Ansatz, weshalb im Rahmen der Bachelorarbeit diese als eine mögliche operative Lösung für den Straßengüterverkehr herangezogen und hinsichtlich zweier Forschungsfragen genauer untersucht wurden. Während sich die erste Forschungsfrage mit den daraus realisierbaren Einsparpotenzialen hinsichtlich des klimaschädlichen Gases CO₂ beschäftigte, war das Ziel der zweiten Fragestellung bedingt durch den Dualitätscharakter der elektromobilen Antriebskonzepten von ökonomischer Natur, die sich auf Basis der zuvor erarbeiteten Erkenntnisse, wie folgt beantworten lassen:



Auch die in der Logistik eingesetzten Fahrzeuge im Straßengüterverkehr lassen sich über die vorgestellten Antriebskonzepte hinsichtlich des Kraftstoffverbrauchs, sowie der Emission von umweltschädlichen Gasen noch weiter optimieren. So können beispielsweise schon mit einem sehr geringen technischen Zusatzaufwand durch Micro-Hybride ein geringerer Energieeinsatz mit einem reduzierten CO₂-Ausstoß realisiert werden. Mit der zunehmenden Elektrifizierung des Antriebsstranges und den daraus resultierenden Wirkungsgradsteigerungen durch Funktionen wie der Start/Stop-Technologie mit Schnellstart, der Bremsrekuperation sowie der starken Boostwirkung durch Energiespeicher, können die Einsparpotenziale sogar weiter gesteigert werden, wobei die hybridisierten Antriebsstrukturen die wesentlichen Vorteile des Verbrennungsmotors mit denen des Elektromotors vereinen und somit den Übergang vom konventionellem Antrieb zum rein elektrischen Antrieb darstellen. Der rein elektrische Antrieb (BEV) weist dabei durch seinen optimalen Wirkungsgrad und der lokalen Emissionsfreiheit die größten Einsparpotenziale auf, wobei sich hier die CO₂-Emissionen in der energetischen Prozesskette im bereitgestellten Strom vorverlagern können, weshalb rein elektrische Antriebssysteme nur so umweltfreundlich sind, wie der Strom der sie antreibt.

Desweiteren wurde auch deutlich, dass neben dem Elektrifizierungsgrad des Antriebsstranges zusätzlich das Einsatzgebiet und die Betriebsweise der elektromobilen Antriebskonzepte die Höhe der CO₂-Einsparungen mitbestimmen. Demnach können hybride Antriebsstrukturen beispielsweise über ein dynamischeres Fahrprofil bei einer gleichbleibenden Hybridisierungsstufe höhere Einsparungen realisieren, wobei das CO₂-Reduktionspotenzial beim rein elektrischen Antrieb unmittelbar konstant über den verwendeten Strommix abhängt. Ein limitierender Faktor bei den Einsparpotenzialen stellt dabei das Fahrzeuggewicht mit dem jeweiligen Anwendungsgebiet dar, weshalb nicht jedes Antriebskonzept in verschiedene Fahrzeugklassen mit dem gegebenen Einsatzprofil umgesetzt werden kann. So eignen sich die hybridisierten Antriebsstrukturen durch die Unterstützung des

Verbrennungsmotors sowohl für den Nah- als auch für den Fernverkehr, wobei der Einsatzbereich des rein elektrischen Antriebs vorwiegend der städtische Güterverkehr bleibt. Hieraus wird deutlich, dass der Grad der Elektrifizierung abhängig vom Anwendungsgebiet und somit der Fahrzeugklasse unterschiedlich stark ausgeprägt sein kann, welches sich letztendlich auch auf das realisierbare CO₂-Einsparpotenzial auswirkt. Da generell die Sinnhaftigkeit elektrischen Fahrens mit steigendem Fahrzeuggewichts abnimmt, eignen sich besonders leichte Nutzfahrzeuge für eine Elektrifizierung des Antriebsstranges, weshalb sie von der gesamten Bandbreite aller elektromobilen Antriebskonzepte und ihrer zugehörigen Einsparpotenziale profitieren können, wobei für LKW's im Regional- und Fernverkehr lediglich eine Elektrifizierung bis zur Mild-Hybrid-Stufe in Frage kommen, zumal für solche Fahrzeugklassen höhere Elektrifizierungsgrade in diesen Streckenverhältnissen derzeit ohnehin nicht umsetzungsnah erscheinen.

Die nachfolgende Abbildung 14 fasst das Ergebnis der möglichen CO₂-Reduktionspotenziale in den verschiedenen Fahrzeugklassen im logistischen Anwendungsfeld in Bezug auf den Straßengüterverkehr zusammen.

Anwendungs- gebiet	Elektromobile Antriebskonzepte				
	Hybride Antriebsstrukturen			Reines Elektrofahrzeug	
	Micro-Hybrid	Mild-Hybrid	Full-Hybrid	Derzeitiger Strommix ¹¹⁷	Idealer Strommix ¹¹⁸
Leichtes Nutzfahrzeug N1 (Nahverkehr)					
Mittelschwerer LKW N2 (Regionalverkehr)			-	-	-
Schwerer LKW N3 (Fernverkehr)			-	-	-
CO₂-Einsparung	bis zu 10 %	bis zu 20 %	bis zu 30 %	35 %	100 %

 = niedriges CO₂-Einsparpotenzial
 = hohes CO₂-Einsparpotenzial

Notwendige, aber keine hinreichende Bedingung für Nachhaltigkeit

Nachhaltiges Antriebskonzept der Zukunft

Abbildung 14: CO₂-Einsparpotenziale elektromobiler Antriebskonzepte im Straßengüterverkehr

¹¹⁷ Anteil an erneuerbaren Energien: 17,3 %

¹¹⁸ Anteil an erneuerbaren Energien: 100 % (Ökostrom)

Aus der Abbildung 14 geht hervor, dass derzeit das größte CO₂-Einsparpotenzial das leichte Nutzfahrzeug im innerstädtischen Güterverkehr besitzt, indem es in Kombination mit dem idealen Strommix (Anteil der erneuerbaren Energien: 100 %) eine vollständige CO₂-Reduktion realisieren kann und als einzige Kombination den Anspruch einer nachhaltigen Logistik genügt. Alle anderen Kombinationsmöglichkeiten bewirken lediglich Effizienzsteigerungen bis zu maximal 35 %, die die Nachfrage nach Öl senken, aber höchstwahrscheinlich langfristig keinen Nutzen bringen werden. Denn solange der technologische Fortschritt sich lediglich auf eine erhöhte Energieeffizienz beschränkt, ist zu befürchten, dass die eingesparten Effekte durch das starke Wachstum des Transportsektors (vgl. hierzu die Zahlen und Trends aus der Einleitung) schlichtweg überkompensiert werden. Somit stellen die hybriden Antriebsstrukturen und sogar der rein elektrische Antrieb in Kombination mit dem derzeitigen bundesweiten durchschnittlichen Strommix eine notwendige, im Transportsektor aber keine hinreichende Bedingung für Nachhaltigkeit dar. Dennoch sind sie als wichtige technologische Meilensteine auf dem Weg zum absolut umweltfreundlichen Antriebskonzept zu betrachten, die eine zunehmende Unabhängigkeit vom Verbrennungsmotor bewirken, an dessen Ende der rein elektrische Antrieb mit der ausschließlichen Energie aus erneuerbaren Energien steht, welches sich derzeit im logistischen Anwendungsfeld auch nur für den urbanen Einsatz eignet.

In Bezug auf die zweite Forschungsfrage lassen sich dabei folgende Konsequenzen ableiten. Zusätzlich zu den Einschränkungen im Einsatz, steht einer größeren Einführung dieser rein elektrischen Antriebe im Fuhrpark eines Logistikdienstleisters auch der höhere Preis entgegen, weshalb dieses Antriebskonzept nach heutigem Stand noch keine sinnvolle Alternative zum Fahrzeug mit Verbrennungsmotor darstellt. Zwar liegen die Betriebskosten der elektrischen Variante jederzeit deutlich unter denen eines konventionell betriebenen Fahrzeuges, dennoch führen die hohen Batteriepreise im Bereich der Anschaffungskosten des Elektrofahrzeugs insgesamt zu einer Unwirtschaftlichkeit dieser Technologie. Blickt man dabei auf die möglichen Entwicklungen der Gesamtkosten im angenommenen Kostenmodell in Kapitel 5, so ergibt sich für das elektromobile Antriebskonzept ein fallender Verlauf, während der Betrieb des herkömmlichen Fahrzeugs stetig steigender Kosten gegenübersteht. Die zunehmende Wirtschaftlichkeit des Elektrofahrzeugs ist dabei auf das Absinken der Batteriepreise zurückzuführen, wobei die leichten Anstiege bei dem Strompreis kaum ins Gewicht fallen. Beim konventionellen Fahrzeug hingegen, spielt die stetige Erhöhung der Kraftstoffpreise die größte Rolle, die die ökonomische Bewertung dieses Antriebskonzeptes im Laufe der Zeit verschlechtern und somit eine Verschiebung der Vorteilhaftigkeit zugunsten des Elektrofahrzeugs bewirken. Effizienzsteigerungen beim Verbrennungsmotor flachen den Kostenanstieg zwar ab, können aber langfristig auch keine Lösung bieten. Erst durch weitere Preisreduktionen im Bereich der elektrochemischen Energiespeicher und der gleichzeitig steigenden Kraftstoffpreise, wird der Einsatz eines elektromobilen Fahrzeuges, unter Berücksichtigung der Einsatzrestriktionen, auch im städtischen Güterverkehr interessant. Das Elektrofahrzeug im angenommenen Kostenmodell überschreitet dabei erstmalig im Jahr 2024 die gewinnmaximierende Schwelle, indem die hohen Anschaffungspreise des Elektrofahrzeugs durch niedrige Betriebskosten kompensiert werden. Die Einführung könnte jedoch durch finanzielle Förderungen, steuerlichen Anreizen und strengeren Abgasgesetzgebungen forciert, sowie durch noch stärker steigende Kraftstoffpreise beschleunigt werden, weshalb es nur noch eine Frage der Zeit bleibt, bis der

elektromobile Antrieb sogar noch früher den Transportsektor, allerdings vorerst nur den städtischen Güterverkehr, im Rahmen einer nachhaltigeren Logistik elektrifiziert.

Literatur- und Quellenverzeichnis

- BCG (2009). *Batteries for Electric Cars: Challenges Opportunities and the Outlook to 2020*. Boston/Massachusetts: Eigenverlag.
- Beidl, C., Schmitt, M., Kluin, M., & Lenzen, B. (Juni 2011). Potenziale hybridisierter Nutzfahrzeuge. In: *MTZ - Motortechnische Zeitschrift*, S. 432-473.
- Bretzke, W.-R., & Barkawi, K. (2010). *Nachhaltige Logistik: Antworten auf eine globale Herausforderung*. Berlin/Heidelberg: Springer Verlag.
- Dannenberg, M., & Assadi, J. (2011). *Der Megatrend Elektroauto*. Kassel: Kassel University Press.
- DB. (2010). *The End of the Oil Age*. Nord Amerika: Eigenverlag.
- Esch, T. (November 2010). Effiziente Nutzfahrzeug-Antriebe. In: *MZT - Motortechnische Zeitschrift*, S. 657-658.
- Gregori, G., & Wimmer, T. (2011). *Grünbuch der nachhaltigen Logistik: Handbuch für die ressourcenschonende Gestaltung logistischer Prozesse*. Österreich: Eigenverlag Bundesvereinigung Logistik Österreich.
- Grunwald, A., & Kopfmüller, J. (2012). *Nachhaltigkeit: 2., aktualisierte Auflage*. Frankfurt/Main: Campus Verlag.
- Gudehus, T. (2006). *Logistik 1: Grundlagen, Verfahren und Strategien (VDI-Buch)*. Berlin/Heidelberg: Springer Verlag.
- Harvey, T. (2009). *Gas geben mit Strom: Elektroautos gehört die Zukunft*. Beau Bassin: FastBook Publishing.
- Heitland, H. (2006). *Alternativen im Verkehr: Abschätzung ihrer Chancen und Risiken durch PC-Simulationsmodelle*. Berlin: Frank & Timme Verlag.
- Hofer, K. (2006). *Elektrotraktion: Elektrische Antriebe in Fahrzeugen*. Berlin: VDE Verlag.
- Hofmann, P. (2010). *Hybridfahrzeuge: Ein alternatives Antriebskonzept für die Zukunft*. Wien: Springer Verlag.
- Klauke, D. (2009). *Batterie-Elektrofahrzeuge: Stand der Technik und zukünftiges Entwicklungspotenzial*. Saarbrücken: VDM Verlag.
- Klauke, D. (2009a). *Elektrofahrzeuge: Untersuchung des CO₂-Reduktionspotenzials im PKW-Verkehr*. Saarbrücken: VDM Verlag.
- Matz, A. M., & Elsässer, A. (2009). *Alternative Antriebe im Kraftfahrzeug*. Aachen: Shaker Verlag.
- McKinsey (2009). *Electrifying cars: How three industries will evolve*. New York: Eigenverlag.
- Naunin, D. (2007). *Hybrid-, Batterie- und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge: Technik, Strukturen und Entwicklungen*. Renningen: Expert Verlag.
- Neupert, U., Euting, T., Kretschmer, T., & Notthoff, C. (2009). *Energiespeicher: Technische Grundlagen und energiewirtschaftliches Potenzial*. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag.

- O.V. (2010). *lastmile logistics netzwerk*. Gelsenkirchen/Herne/Herten: Eigenverlag.
- O.V. (2006). *world energy outlook*. Paris: Eigenverlag.
- Ott, K. (1999). *Nachhaltigkeit des Wissens: Zukunftsdialoge im VDI*. Cottbus: BTU Verlag.
- Peren, F., Sundermann, N., & Wittop, B. (1997). *Das Elektroauto und sein Markt*. Frankfurt/Main: Campus Verlag.
- Petschow, U., Hübner, K., & Dröge, S. (1998). *Nachhaltigkeit und Globalisierung (Konzept Nachhaltigkeit)*. Berlin: Springer Verlag.
- Philip, P. (2009). *Change to Green: Handlungsfelder und Perspektiven für nachhaltige Logistik und Geschäftsprozesse*. München: Huss-Verlag.
- Rogall, H. (2012). *Nachhaltige Ökonomie: Ökonomische Theorie und Praxis einer Nachhaltigen Entwicklung*. Marburg: Metropolis Verlag.
- Rummich, E. (2008). *Energiespeicher: Grundlagen - Komponenten - Systeme und Anwendungen*. Renningen: Expert-Verlag.
- Schönberger, R., & Elbert, R. (2010). *Dimensionen der Logistik: Funktionen, Institutionen und Handlungsebenen*. Wiesbaden: Gabler Verlag.
- Schuler, B. (2011). *Elektromobilität und Elektrofahrzeuge: Ökonomische Bewertung des Marktpotenzials im Jahr 2020*. Hamburg: Diplomica Verlag.
- Spitz, B. (2011). *Nachhaltigkeit in der Logistik unter besonderer Betrachtung der Emissionsreduzierung im Güterverkehr*. Bremen: Europäischer Hochschulverlag GmbH & Co. KG.
- Stangner, P. (2010). *Paradigmawandel automobiler Antriebstechnologien: eine techno-ökonomische Analyse unter Berücksichtigung umweltpolitischer Instrumente*. Düsseldorf: VDI Verlag.
- VDI (18. November 2011). Daimler-Tochter Fuso präsentiert schweren Lkw mit Hybridantrieb. In: *VDI Nachrichten*, S. 17.
- Voß, B. (2005). *Hybridfahrzeuge*. Renningen: Expert Verlag.
- Wallentowitz, H., Freialdenhofen, A., & Olschewski, I. (2010). *Strategien zur Elektrifizierung des Antriebstranges: Technologien, Märkte und Implikationen*. Wiesbaden: Vieweg + Teubner Verlag.
- Weinreich, S. (2003). *Nachhaltige Entwicklung im Personenverkehr: Eine quantitative Analyse unter Einbezug externer Kosten*. Heidelberg: Physica Verlag.
- Wietschel, M., Bünger, U., & Weindorf, W. (2010). *Vergleich von Strom und Wasserstoff als CO₂-freie Endenergieträger: Endbericht; Studie im Auftrag der RWE AG*. Karlsruhe: ISI Verlag.
- Yay, M. (2010). *Elektromobilität: Theoretische Grundlagen, Herausforderungen sowie Chancen und Risiken der Elektromobilität, diskutiert an den Umsetzungsmöglichkeiten in die Praxis*. Frankfurt: Peter Lang Verlag.

Onlinequellen

AFEE (2012). Agentur für erneuerbare Energien: Deutschlands Informationsportal zu erneuerbaren Energien. Online im Internet unter: <http://www.unendlich-viel-energie.de> (Letzter Zugriff: 4.9.2012)

AMZ (2011). Volvo liefert ersten Hybrid-LKW für Handelskonzern Spar. Online im Internet unter: <http://www.amz.de/news/newsartikel/volvo-liefert-ersten-hybrid-lkw-fuer-handelskonzern-spar.html?cHash=61799aba4e21e95625f71a2715d4a6d0> (Letzter Zugriff: 1.9.2012)

ATZ Online (2010). Leichte Nutzfahrzeuge: EU-Umweltminister verordnen Reduzierung der Emissionen. Online im Internet unter: <http://www.atzonline.de/Aktuell/Nachrichten/1/13030/Leichte-Nutzfahrzeuge-EU-Umweltminister-verordnen-Reduzierung-der-Emissionen.html> (Letzter Zugriff: 4.9.2012)

AutoMotor (2012). Erste Zwischenbilanz für den Mercedes Vito E-Cell. Online im Internet unter: <http://www.auto-motor.at/Auto/Neuwagen/Automarken-Automodelle-Neuigkeiten/Mercedes-News/Mercedes-Vito-E-Cell-Zwischenbilanz.html?REF=feed> (Letzter Zugriff: 6.9.2012)

BAFU (2003). Bundesamt für Umwelt: Projekt 'Monet'. Online im Internet unter: <http://www.bafu.admin.ch/dokumentation/medieninformation/00962/index.html?lang=de&msg-id=1623> (Letzter Zugriff: 9.8.2012)

BDEW (2010). Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft: Durchschnittswerte der allgemeinen Stromversorgung in Deutschland. Online im Internet unter: [http://bdew.de/internet.nsf/id/1E7BD75876AE0D08C1257823003ED8C4/\\$file/2011-10-06%20Bundesmix%202010%20Stromkennzeichnung.pdf](http://bdew.de/internet.nsf/id/1E7BD75876AE0D08C1257823003ED8C4/$file/2011-10-06%20Bundesmix%202010%20Stromkennzeichnung.pdf) (Letzter Zugriff: 4.9.2012)

BMWi (2012). Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie: Entwicklung von Energiepreisen und Preisindizes. Online im Internet unter: <http://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/Binaer/Energiedaten/energiepreise-und-energiekosten1-entwicklung-energiepreise-preisindizes.property=blob,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.xls> (Letzter Zugriff: 10.9.2012)

BVL (2012). Bundesvereinigung Logistik: Wissenschaftliche Definition von Logistik. Online im Internet unter: <http://www.bvl.de/logistik--scm/defintion> (Letzter Zugriff: 4.8.2012)

GTAI (2011). Germany Trade & Invest. Online im Internet unter: <http://www.gtai.de/GTAI/Navigation/DE/Trade/maerkte,did=75182.html> (Letzter Zugriff: 12.9.2012)

Gustke Logistik (2010). Freie Fahrt für 'grüne' LKW. Online im Internet unter: <https://www.gustke-logistik.com/de/qualitaet-und-umwelt/hybrid-lkw.html> (Letzter Zugriff: 1.9.2012)

Oelschläger, H. (2010). *Elektrifizierung des Antriebsstranges bei leichten Nutzfahrzeugen*. Online im Internet unter: <http://www.vda.de/de/downloads/911> (Letzter Zugriff: 25.8.2012)

PricewaterhouseCoopers (2009). Land unter für den Klimaschutz? Online im Internet unter: http://www.btl-bb.de/fileadmin/login/bilder/dokumente/090506_DOK_PWC-Studie_Klimaschutz.pdf (Letzter Zugriff: 26.7.2012)

Shell (2010). Shell Lkw-Studie: Fakten, Trends und Perspektiven im Straßengüterverkehr bis 2030. Online im Internet unter: http://elib.dlr.de/64553/1/shell_truck_study_2030.pdf (Letzter Zugriff: 4.9.2012)

Spindler, E. (2012). Geschichte der Nachhaltigkeit. Online im Internet unter: <http://www.nachhaltigkeit.info/media/1326279587phpeJPvC.pdf> (Letzter Zugriff: 2.8.2012)

VCD (2012). Verkehrsclub Deutschland: Entwicklung des CO₂-Grenzwertes bis heute. Online im Internet unter: <http://www.vcd.org/co2grenzwert.html> (Letzter Zugriff: 12.9.2012)

VISUM (2012). Virtuelle Schule für Umweltmanagement: Nachhaltigkeit messen. Online im Internet unter: <http://www.visumsurf.ch/elearn.php?thema=Nachhaltigkeit&type=text&such=vtboLP111y&such2=LP1114y&limit=8&l=&b=vt&> (Letzter Zugriff: 9.8.2012)

Sonstige Quellen

IFAM (2012). Institut für Fertigungstechnik und angewandte Materialforschung, u.a. auch für elektrische Komponenten und Systeme. Persönliches Gespräch mit Herrn Prof. Dr.-Ing. Matthias Busse (Institutsleiter) am 6.8.2012.

Anhang

a) Daten der Referenzfahrzeuge

Vito 110 CDI		Vito E-Cell	
Antriebsaggregat	Dieselmotor	Antriebsaggregat	Elektromotor
Antrieb	Heckantrieb	Antrieb	Frontantrieb
Motorleistung	70 kW	Motorleistung	60kW
Nenndrehmoment	250 Nm	Nenndrehmoment	280 Nm
Zylinderanzahl	4 in Reihe	Batteriekapazität	36 kWh
Hubraum	2143 cm ³	Reichweite	130 km ¹¹⁹
Abgasnorm	Euro 5	Höchstgeschwindigkeit	80 km/h ¹²⁰
Tankinhalt	75 l	Ladezeit (400 V)	5 Std

Tabelle 8: Technische Daten der Referenzfahrzeuge¹²¹

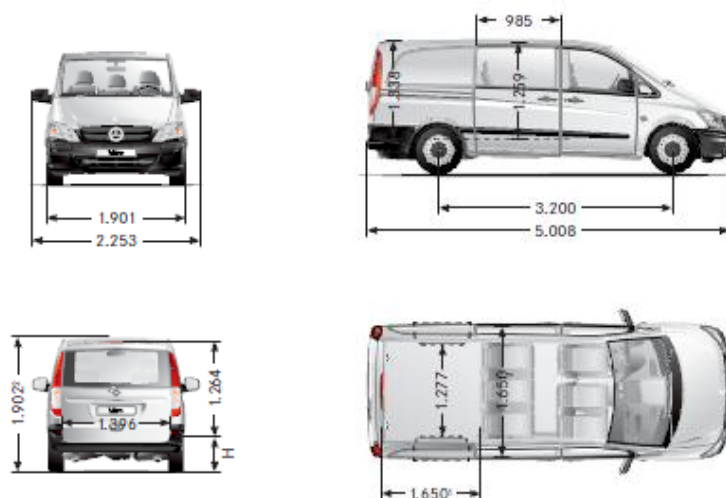


Abbildung 15: Abmessungen der Referenzfahrzeuge¹²²

¹¹⁹ Nach neuem europäischen Fahrzyklus (NEFZ)

¹²⁰ Höchstgeschwindigkeit darf auch z.B. bei langer Bergfahrt nicht überschritten werden

¹²¹ In Anlehnung an Onlinequelle: http://www.mercedes-benz.de/content/germany/mpc/mpc_germany_website/de/home_mpc/van/home/new_vans/models/vito_639/panel_van/_advice_sales/broschue.html

¹²² Onlinequelle: http://www.mercedes-benz.de/content/media_library/germany/mpc_germany/de/mercedes-benz_deutschland/transporter_ng/neue_transporter/vito/transporter_vito_kawa.object-Single-MEDIA.download.tmp/Broschuere_Vito-Kastenwagen-Mixto_111004.pdf

b) Gesamtkostenentwicklung des konventionellen Referenzfahrzeuges

Vito 110 CDI			
Jahr	Anschaffungskosten	Betriebskosten	Gesamtkosten
2012	30000 €	5292,27 €	35292,27 €
2013	30000 €	5406,42 €	35406,42 €
2014	30000 €	5523,03 €	35523,03 €
2015	30000 €	5642,15 €	35642,15 €
2016	30000 €	5763,85 €	35763,85 €
2017	30000 €	5888,17 €	35888,17 €
2018	30000 €	6015,17 €	36015,17 €
2019	30000 €	6144,91 €	36144,91 €
2020	30000 €	6277,45 €	36277,45 €
2021	30000 €	6412,85 €	36412,85 €
2022	30000 €	6551,17 €	36551,17 €
2023	30000 €	6692,48 €	36692,48 €
2024	30000 €	6836,83 €	36836,83 €
2025	30000 €	6984,29 €	36984,29 €
2026	30000 €	7134,93 €	37134,93 €
2027	30000 €	7288,83 €	37288,83 €
2028	30000 €	7446,04 €	37446,04 €
2029	30000 €	7606,65 €	37606,65 €
2030	30000 €	7770,71 €	37770,71 €
2031	30000 €	7938,32 €	37938,32 €
2032	30000 €	8109,54 €	38109,54 €
2033	30000 €	8284,46 €	38284,46 €
2034	30000 €	8463,15 €	38463,15 €
2035	30000 €	8645,69 €	38645,69 €

Tabelle 9: Gesamtkostenentwicklung des konventionellen Referenzfahrzeuges

c) Gesamtkostenentwicklung des rein elektrischen Referenzfahrzeuges

Vito E-Cell			
Jahr	Anschaffungskosten + Batteriemodul	Betriebskosten	Gesamtkosten
2012	56983,09 €	417,35 €	57400,43 €
2013	53793,69 €	429,10 €	54222,79 €
2014	50981,28 €	440,86 €	51422,14 €
2015	48501,30 €	452,61 €	48953,91 €
2016	46314,45 €	464,36 €	46778,81 €
2017	44386,08 €	476,12 €	44862,20 €
2018	42685,65 €	487,87 €	43173,52 €
2019	41186,21 €	499,63 €	41685,83 €
2020	39864,00 €	511,38 €	40375,38 €
2021	38698,08 €	523,13 €	39221,21 €
2022	37669,97 €	534,89 €	38204,85 €
2023	36763,38 €	546,64 €	37310,02 €
2024	35963,95 €	558,40 €	36522,34 €
2025	35259,01 €	570,15 €	35829,16 €
2026	34637,40 €	581,90 €	35219,30 €
2027	34089,26 €	593,66 €	34682,91 €
2028	33605,91 €	605,41 €	34211,32 €
2029	33179,69 €	617,17 €	33796,86 €
2030	32803,85 €	628,92 €	33432,77 €
2031	32472,44 €	640,67 €	33113,11 €
2032	32180,19 €	652,43 €	32832,62 €
2033	31922,50 €	664,18 €	32586,68 €
2034	31695,26 €	675,94 €	32371,19 €
2035	31494,88 €	687,69 €	32182,57 €

Tabelle 10: Gesamtkostenentwicklung des rein elektrischen Referenzfahrzeuges

Universität Bremen
Fachbereich Wirtschaftswissenschaften
Lehrstuhl für ABWL und Logistikmanagement
Wilhelm-Herbst-Str. 12
28359 Bremen

Telefon: +49 0421 218 66981
E-Mail: kotzab@uni-bremen.de
www.lm.uni-bremen.de

ISSN 2365-2101

Als wissenschaftliches elektronisches Dokument veröffentlicht in der Staats- und
Universitätsbibliothek Bremen und auf dem Lehrstuhlserver

Veröffentlicht: 2015